



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

AKTIVNÍ ŠUMOVÁ RADIOMETRIE A JEJÍ APLIKACE

ACTIVE NOISE RADIOMETRY AND ITS APPLICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Hudec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Marek Hudec

ID: 203567

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Aktivní šumová radiometrie a její aplikace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou vysokofrekvenčních šumových elektromagnetických polí a jejich typickými vlastnostmi. Prostudujte možnosti jejich využití pro snímání odrazivosti, pohltivosti a jiných fyzikálních vlastností materiálů a také snímání profilů složených materiálových struktur. Diskutujte možnosti zvyšování výkonu šumových zářičů. Navrhněte konceptuální, konstrukční a elektronické řešení systému aktivní šumové radiometrie pro generaci a měření interakce šumového pole v mikrovlnné oblasti spektra. Diskutujte možnosti jeho adaptace pro experimentální ověření mikrovlnné šumové tomografie.

Navržený systém aktivní šumové radiometrie realizujte. Navrhněte uspořádání základních experimentů pro ověření jeho vlastností. S realizovaným systémem proveďte experimenty pro ověření jeho vlastností a parametrů. Závěry získané z experimentů porovnejte s teoretickými předpoklady, případně se závěry jiných podobných prací. Diskutujte možné úpravy pro zlepšení parametrů systému.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Polivka, J. An overview of microwave sensor technology. High Frequency Electronics. 2007, 6(4), 32-42.

[2] Polivka, J. Noise can be good, too. Microwave Journal. 2004, 47(3), 66-73.

Termín zadání: 16.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Obsahom tejto práce je preskúmať uplatnenie mikrovlnného šumového poľa v aktívnej rádiometrii. Prvá časť práce je zameraná na teoretický popis fyzikálnych dejov, ktorých dôsledkami sú rôzne typy šumového signálu. Ďalej sú popísané vlastnosti šumu a šumového poľa, pre ktoré by mohol mať šum potenciálne využitie v rádiometrii. Následne sú popísané samotné princípy rádiometrie, kde sú vysvetlené mechanizmy šírenia elektromagnetických vln v látkových prostrediach a tiež koncept rádiometru, ako nástroja na meranie vyžarovania materiálových objektov. Prvá časť končí použitím aktívnej rádiometrie v kombinácii so šumovým poľom. Druhá časť práce je zameraná na návrh meracieho systému šumovej rádiometrie, kde sú využité teoretické poznatky z prvej časti. Návrh sa zaoberá celkovým konceptom meracieho systému, jednotlivými konfiguráciami merania vlastností materiálov, návrhom šumového rádiometra a šumového žiariča. Priestor je taktiež venovaný možnostiam zvyšovania šumového výkonu žiariča. Posledná časť je venovaná mikrovlnnej šumovej tomografii, jej porovnanie s optickou koherenčnou tomografiou a Michelsonovho interferometra ako nástroja pre skúmanie profilu materiálových štruktúr pomocou šumového poľa.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

šum, rádiometria, elektromagnetická vlna, žiarenie, tomografia, rádiometer, anténa

ABSTRACT

The aim of this work is to analyze the application of microwave noise field in active radiometry. The first part of the thesis is focused on the theoretical description of physical processes that result in different types of noise signal. Furthermore, the properties of noise and noise field for which noise could have potential applications in radiometry are described. The principles of radiometry itself are then described, in which the mechanisms of electromagnetic wave propagation in material environments are explained, as well as the concept of the radiometer as a tool for measuring radiation of material objects. The first part of the work is concluded with the use of active radiometry in combination with a noise field. The second part of the thesis is focused on the design of a noise radiometry measurement system, in which the theoretical knowledge from the first part is applied. The design deals with the overall concept of the measurement system, the different configurations for measuring material properties, the design of the noise radiometer and the noise radiator. The possibilities of increasing the noise performance of the radiator are also discussed. The last section of the work is devoted to microwave noise tomography, its comparison with optical coherence tomography, and the Michelson interferometer as a tool for examining the profile of material structures using a noise field.

KEYWORDS

noise, radiometry, electromagnetic wave, radiation, tomography, radiometer, antenna

HUDEC, Marek. *Aktivní šumová radiometrie a její aplikace*. Diplomová práce. Brno: Brno University of Technology, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2024. Vedúci práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Bc. Marek Hudec
VUT ID autora: 203567
Typ práce: Diplomová práca
Akademický rok: 2023/24
Téma záverečnej práce: Aktivní šumová radiometrie a její aplikace

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi doc. Ing. Petrovi Drexlerovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	13
1 Šumový signál a jeho vlastnosti	14
1.1 Šum z hladiska polohy zdroja	14
1.2 Mechanizmy vzniku šumu v elektrických obvodoch	15
1.2.1 Tepelný šum (Johnsonov šum)	15
1.2.2 Výstrelový šum	16
1.2.3 Šum $1/f$	17
1.3 Parametre pre popis šumových signálov	18
1.3.1 Pomer SNR	18
1.3.2 Šumový faktor	18
1.3.3 Šumové číslo	19
1.3.4 Šumová teplota	19
1.3.5 Excess noise ratio	19
2 Zdroje šumových signálov	20
2.1 Polovodičové zdroje šumového signálu	20
2.1.1 Zenerová dióda	20
2.1.2 Prechod tranzistoru emitor-báza	21
2.2 Ďalšie zdroje šumového signálu	21
2.2.1 Tepelný šum na rezistore	21
2.2.2 Vakuová dióda	21
2.2.3 Plynová výbojka	21
3 Šumové elektromagnetické pole	22
3.1 Vlastnosti šumového poľa	22
3.2 Vznik šumového poľa	23
3.2.1 Dipólová anténa	23
3.2.2 Bikonická anténa	23
3.2.3 Bow-tie anténa	23
3.2.4 Lievikova antena	23
3.3 Využitie šumových polí	24
4 Mikrovlnná rádiometria	26
4.1 Rádiometria a jej aplikácie	26
4.2 Mikrovlnný rádiometer	29
4.3 Použitie šumu v rádiometrií	31

5	Možnosti zvyšovania citlivosti aktívnej šumovej rádiometrie	32
5.1	Zvýšenie úrovne žiarenia šumového žiariča	32
5.1.1	Použitie výkonného zdroja šumu	32
5.1.2	Použitie viacerých žiaričov	33
5.1.3	Použitie reflektora	35
5.2	Zvýšenie citlivosti rádiometra	35
6	Návrh šumového rádiometra	36
6.1	Znižovací konvertor frekvencie	36
6.2	Synchrónny detektor	39
6.2.1	Detektor obálky	39
6.2.2	Demodulátor	41
6.3	Dolnopriepustný filter	42
6.4	Návrh plošného spoja a konštrukcia	43
7	Návrh šumového mikrovlnného žiariča	47
7.1	Výber zdroja šumu	47
7.1.1	Návrh ENR testera	47
7.1.2	Meranie ENR	48
7.2	Anténa žiariča	50
7.2.1	Overenie šumového žiarenia jedného dipólu	51
7.2.2	Overenie šumového žiarenia dvoch dipólov	53
7.3	Napájanie šumového žiariča	55
7.4	Modulačný signál	57
8	Experimentálne overenie systému	61
8.1	Overenie parametrov systému	61
8.1.1	Meranie úrovne prijatého signálu v závislosti na vzdialenosti od žiariča	61
8.1.2	Meranie vyžarovacej charakteristiky	65
8.1.3	Referenčné meranie pre posúdenie odrazivosti materiálov v závislosti na uhle dopadu	66
8.1.4	Meranie závislosti signálu rádiometra na budiacom prúde žiariča	68
8.2	Meranie priepustnosti materiálovej vzorky	68
8.3	Meranie odrazivosti materiálovej vzorky	72
9	Možnosti zlepšovania parametrov systému	77
9.1	Koncept 2D snímania materiálovej štruktúry	77
9.2	Koncept mikrovlnnej šumovej tomografie	77

Závěr	80
Literatúra	81
Zoznam symbolov a skratiek	84

Zoznam obrázkov

1.1	Časový priebeh priebeh šumu	14
1.2	Porovnanie spektra tepelného a bieleho šumu	16
1.3	Zobrazenie rozdelenia pravdepodobnosti napätia tepelného šumu . . .	17
1.4	Porovnanie šumov	18
3.1	Princíp optickej koherenčnej tomografie	25
4.1	Aktívna rádiometria	26
4.2	Odraz a lom svetla	29
4.3	Principiálna schéma mikrovlnného rádiometra	30
5.1	Porovnanie zisku jedného dipólu so ziskom dvoch dipólov	34
6.1	LNB konvertor bloková schéma	37
6.2	Diódový detektor	39
6.3	Kaskádny násobič napätia, $n=4$	40
6.4	Výstupné napätie v simulácií na násobiči	40
6.5	Princíp synchronnej detekcie	42
6.6	Bloková schéma systému aktívnej šumovej rádiometrie	43
6.7	Celková schéma zapojenia rádiometra	45
6.8	Návrh plošného spoja rádiometra - TOP	45
6.9	Osadzovací výkres rádiometra - strana TOP	46
6.10	Konštrukcia rádiometra	46
7.1	Schéma zapojenia ENR testera	48
7.2	Doska plošného spoja ENR testera	49
7.3	Osadzovací výkres ENR testera	50
7.4	Fotografia ENR testera	51
7.5	Výstupné napätie U_{outD} pre jeden dipól v závislosti na vzdialenosti .	53
7.6	Zisťovanie vplyvu vzájomnej vzdialenosti dipólov na U_{outD}	54
7.7	Porovnanie U_{outD} pri rôznej vertikálnej vzdialenosti dvoch dipólov . .	54
7.8	Funkcia napätia na vzdialenosti pri vertikálnej vzdialenosti 10cm s reflektorom	55
7.9	Fotografia finálneho šumového žiariča	56
7.10	Schéma zapojenia šumového žiariča	57
7.11	Návrh plošného spoja napájania šumového žiariča	58
7.12	Osadzovací výkres šumového žiariča	58
7.13	Konštrukcia plošného spoja napájania šumového žiariča	59
8.1	FSPL	62
8.2	vzdialenosť	63
8.3	Závislosť výstupnej úrovne rádiometra na krátkej vzdialenosti od šumového žiariča	64

8.4	Vyžarovacia horizontálna charakteristika šumového žiariča	65
8.5	Schématické zobrazenie teplôt na diódach šumového žiariča (pohľad z predu)	66
8.6	Závislosť výstupného napätia rádiometra na budiacom prúde žiariča .	69
8.7	Oscilogram modulovaného prúdu a výstupu rádiometra	70
8.8	Oscilogram nemodulovaného prúdu a výstupu rádiometra	72
8.9	Teoretická závislosť prúdovej šumovej hustoty na modulovanom budiacom prúde žiariča	73
8.10	Meranie priepustnosti extrudovaného polystyrénu	75
8.11	Meranie priepustnosti materiálovej štruktúry	75
8.12	Fotografia merania odrazivosti plechu	76
8.13	Závislosť odrazivosti materiálu na uhle natočenia od kolmice rozhrania	76
9.1	Princíp mikrovlnnej šumovej tomografie	78

Zoznam tabuliek

5.1	Typy šumových diód, ich ENR a frekvenčný rozsah	33
6.1	LNB konvertory a ich parametre	38
8.1	Výstupné hodnoty rádiometra v závislosti na vychýlení od osy žiariča	67
8.2	Merané hodnoty priepustnosti	71
8.3	Merané hodnoty priepustnosti materiálovej štruktúry	71
8.4	Merané hodnoty odrazivosti	74
8.5	Merané hodnoty odrazivosti materiálovej vzorky pri rôznych uhloch dopadu	74

Úvod

V dnešnom modernom svete sa kroky človeka čoraz viac orientujú na využívanie bezdrôtovej technológie vo všetkých možných oblastiach života. Preto sa mnoho fyzikálnych výskumov zameriava práve na oblasť elektromagnetických vln, prevažne vo vyššej oblasti frekvenčného spektra. Je preto na mieste poznať spôsoby, ako efektívne spracovávať a merať účinky elektromagnetických vln tak, aby boli užitočné pre potreby ľudstva.

Meraním účinkov elektromagnetických vln sa zaoberá rádiometria ako vedný odbor. Táto práca má za cieľ vykonať rozbor možností a využitia šumových signálov v rádiometrii a jej aplikáciach, vysvetliť spôsoby merania a vlastnosti mikrovlnného šumového elektromagnetického poľa. Zaoberá sa taktiež návrhom meracieho systému aktívnej šumovej rádiometrie a diskutuje jej možnú implementovateľnosť v oblasti mikrovlnnej šumovej tomografie.

Prvá časť práce je venovaná problematike šumu, ktorého vlastnosti šumová rádiometria využíva. V tejto časti sú popísané jednotlivé typy šumového signálu, základné parametre a taktiež diskusie o zvyšovaní výkonu šumového žiariča. Ďalej sa práca venuje základom rádiometrie a vysvetľuje koncept šumovej rádiometrie. Uvádza možnosti využitia mikrovlnných šumových polí na prieskum vlastností materiálových štruktúr, ako je odrazivosť, absorpcia, prenos materiálu a ďalšie. Popisuje mechanizmy šírenia elektromagnetického poľa v materiáli a ich spätné spracovanie pomocou rádiometra.

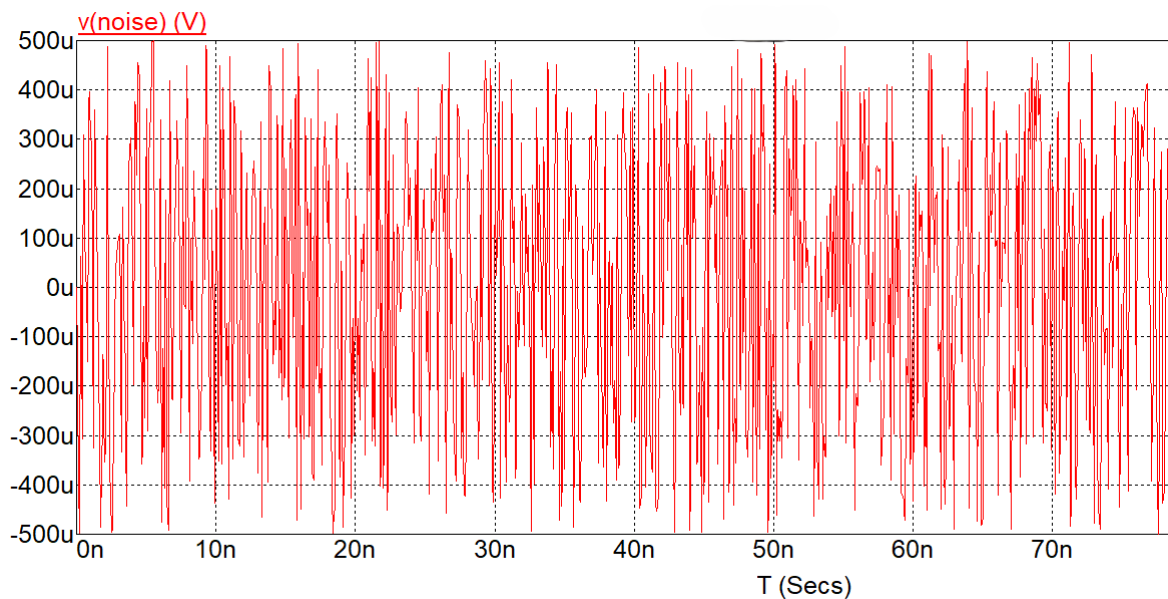
V druhej časti práce je priestor venovaný návrhu meracieho systému aktívnej šumovej rádiometrie, ktorý pozostáva z návrhu šumového žiariča, rádiometra a konfigurácií pre meranie jednotlivých vlastností materiálu. Je v nej riešený výber vhodných elektronických komponentov a elektrické zapojenie systému. Následne popisuje experimenty overenia vlastností systému, z ktorých výsledky sa používajú ako referenčné hodnoty pri experimentálnom overení systému na materiálových vzorkách. V týchto kapitolách sú popísané experimenty merania priepustnosti a odrazivosti rôznych homogénnych materiálových vzoriek.

V predposlednej kapitole sa práca zaoberá diskusiou o zlepšovaní vlastností systému a rozšírení jeho využitia v mikrovlnnej šumovej tomografii.

Poslednou kapitolou je záver, v ktorom sú zhrnuté poznatky tejto práce.

1 Šumový signál a jeho vlastnosti

Šum je možné definovať vo všeobecnosti ako nechcený jav prejavujúci sa náhodnými fluktuáciami v pozorovanom fyzikálnom systéme. V oblasti elektroniky ho môžeme popísať ako stochasticky meniaci sa elektrický signál v čase, ktorý vzniká v dôsledku náhodných fyzikálnych procesov častíc daného elektrického obvodu. Jeho prítomnosť môže spôsobovať zníženie citlivosti zariadení na vstupné signály, čo sa prejavuje najmä v komunikačnej technike, kde znižuje citlivosť prijímačov a degraduje kvalitu preneseného signálu. Preto je často zámerne potláčaný[1].



Obr. 1.1: Časový priebeh šumového signálu

V nasledujúcich podkapitolách budú približné niktore základné mechanizmy vzniku šumu a tiež jednotlivé typy šumov, ktoré sú zavedené na základe špecifických fyzikálnych vlastností konkrétnych šumových signálov.

1.1 Šum z hľadiska polohy zdroja

Šum, ktorý nevzniká priamo v pozorovanom systéme, ale prichádza zvonku a ovplyvňuje systém, môžeme nazvať ako externý. Zdrojom je iný objekt, od ktorého sa šum šíri do skúmaného obvodu, prostredníctvom určitého média alebo voľného priestoru do pozorovaného systému. V reálnom svete sa prejavuje niekoľko foriem externého šumu, ktoré pôsobia na elektronické systémy. Medzi nimi je napríklad šum pochádzajúci z atmosféry Zeme. Je to prírodný šum spôsobený prevažne bleskovými výbojmi v

atmosfére. Má povahu napätových výbojov, pričom s vyznačuje širokým spektrom a ne-gaussovským rozložením amplitúdy signálu [2].

Ďalším zdrojom externého šumu, ktorý pochádza z prírodných procesov je šum prichádzajúci z vesmíru. Jeho zdrojom je napríklad aktivita Slnka. Na Zem dopadá v širokom frekvenčnom pásme. Pôvod môže byť aj mimo Slnčnej sústavy, od vzdialených vesmírnych objektov vyžarujúcich elektromagnetické vlny, ako sú vzdialené hviezdy, pulzary a podobne.

Vo veľkej miere na pozorovaný systém externe pôsobí aj šum spôsobený okolitými zariadeniami vytvorenými človekom, nazývaný tiež industriálny šum. Tieto zariadenia produkujú šum s rôznymi výkonovými úrovňami, v rôznych frekvenčných pásmach, pričom tento druh šumu je veľmi výrazný oproti predchádzajúcim - najmä v miestach pôsobnosti zdrojových zariadení [3]. Z tohto dôvodu je zavedený pojem elektromagnetickej kompatibility, ktorý definuje schopnosť prístroja neovplyvňovať okolité zariadenia vlastným elektromagnetickým vyžarovaním a zároveň schopnosť odolávať tomuto vyžarovaniu. Šum môže byť generovaný aj samotným pozorovaným systémom, na ktorý má negatívne účinky. Tento šum je nazývaný ako interný. Je spôsobený fyzikálnymi mechanizmami v elektronických súčiastkach daného zariadenia.

Tento prípad vzniku šumu je presne prípadom umelého, človekom vyrobeného externého šumu. Zároveň je aj najzaujímavejší z hľadiska využitia, pretože ako jediný môže byť zámerne vytvorený a ovplyvňovaný na rozdiel od prírodných šumov. Mechanizmy jeho vzniku budú popísane v nasledujúcej podkapitole.

1.2 Mechanizmy vzniku šumu v elektrických obvodoch

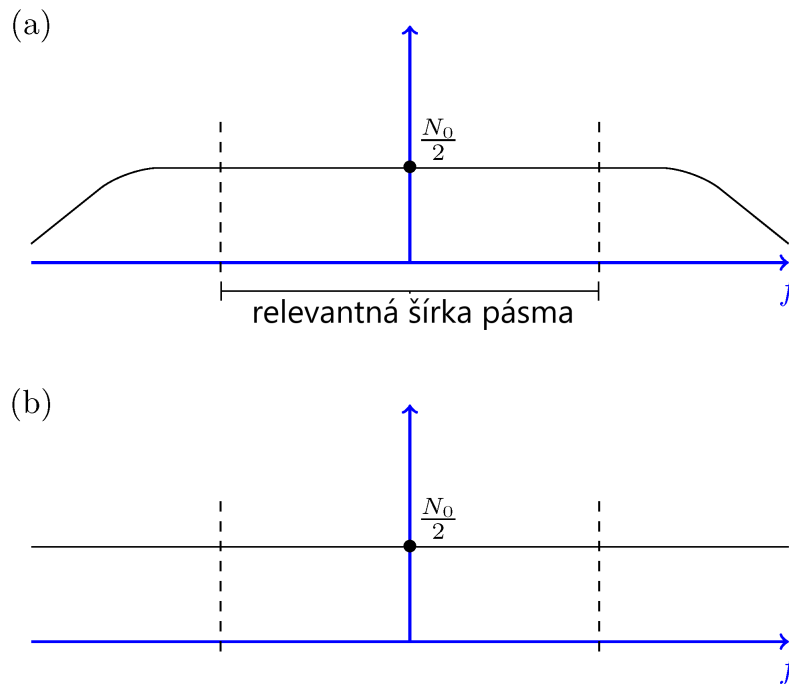
1.2.1 Tepelný šum (Johnsonov šum)

Tepelný šum vzniká v dôsledku nenulovej teploty častí v elektrickom obvode. Náhodným pohybom nosičov náboja v elektrických vodičoch sa vytvárajú určité potenciálové rozdiely, čo má za následok vznik šumového napätia. Čím je teplota vodiča vyššia, tým viac rastie rýchlosť pohybu častíc, a tým rastie aj šumové napätie. Spolu s napätím rastie aj výkonová úroveň tepelného šumu, ktorú môžeme zapísať ako:

$$P_n = k_B \cdot T \cdot B, \quad (1.1)$$

kde k_B je Boltzmanova konštanta, T je šumová teplota a B je šírka pásma šumového signálu. Tepelný šum je popísaný pomocou spektra, ktoré má konštantnú spektrálnu hustotu, preto je uvádzaný aj ako biely šum [1]. Je však nutné poznamenať, že tepelný a biely šum majú síce rovnaký charakter spektra, avšak určite nemajú spektrum rovnaké. Biely šum je teoretický signál, ktorý má konštantné spektrum pozdĺž nekonečného frekvenčného pásma. Z tohto tvrdenia vyplýva, že biely šum

má nekonečný spektrálny výkon. Tepelný šum je však reálny signál a preto má jeho spektrum konečnú šírku pásma. Na šírku pásma majú vplyv selektívne vlastnosti obvodu, ako sú kapacity a indukčnosti, ktoré by sa prejavujú pri pripojení šumového rezistora do elektrického obvodu [?]. Porovnanie spektra tepelného a bieleho šumu je na obrázku nižšie.

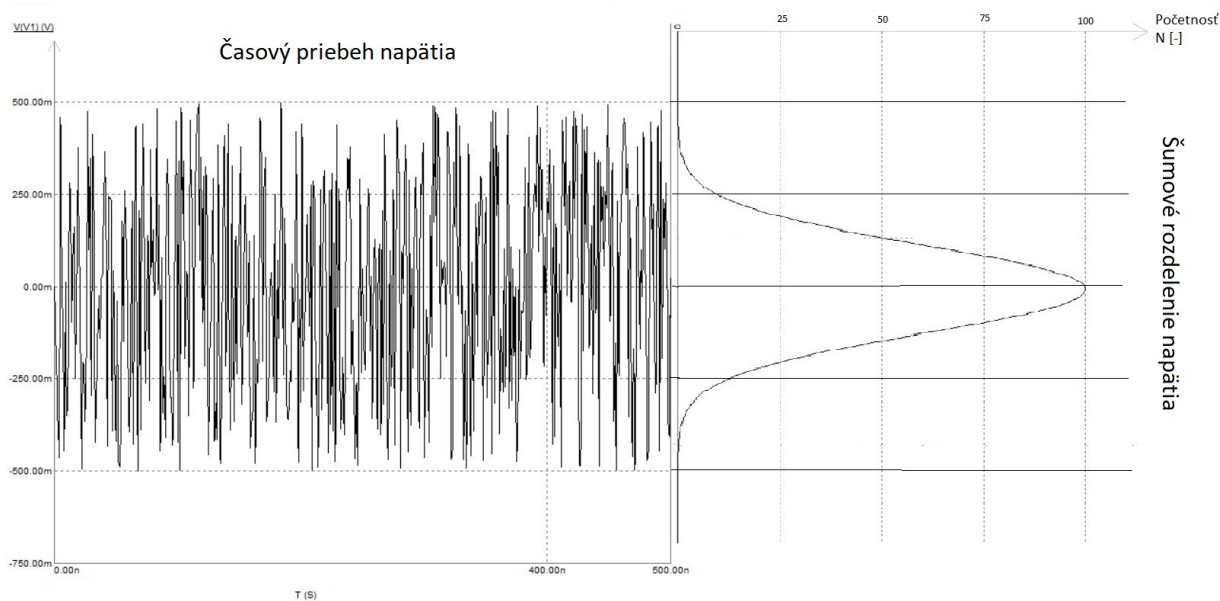


Obr. 1.2: Spektrum tepelného a bieleho šumu: a) tepelný šum b) biely šum [?]

Je taktiež popísaný rozložením pravdepodobnosti výskytu šumového napätia v čase. Toto rozloženie je gaussovského charakteru [1]. Preto sa tepelný šum označuje aj ako gaussovský šum.

1.2.2 Výstrelový šum

Výstrelový šum vzniká najmä pri prechode nosičov náboja PN prechodom. Náboj elektrónu má presne definovanú konečnú hodnotu, preto sa pri toku elektrického prúdu prenáša náboj v určitých diskretných množstvách a nie spojitým spôsobom. Táto nespojitosť má za následok štatistické prúdové fluktuácie. Tie sa prejavujú ako náhodné "výstrely" prúdu v čase. Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim výstrelový šum je, aby nosiče náboja pôsobili nezávisle na sebe. Táto podmienka je splnená práve pri PN prechode, pri ktorom sa náboj pohybuje difúziou. Nie je však tomu tak pri prechode prúdu odporovým metalickým vodičom, pri ktorom sa náboje navzájom ovplyvňujú. Preto je hodnota výstrelového šumu výrazne nižšia v metalických vodičoch



Obr. 1.3: Zobrazenie rozdelenia pravdepodobnosti napätia tepelného šumu

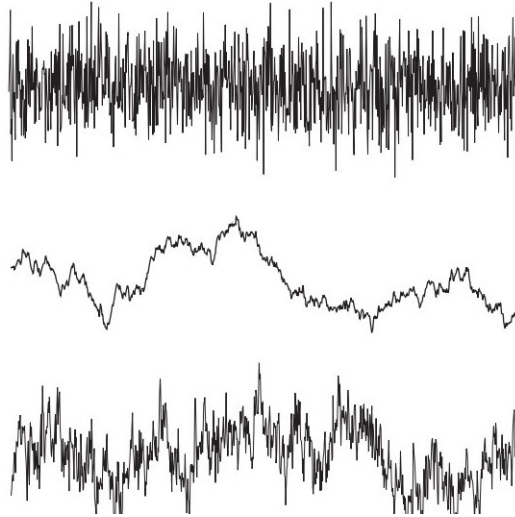
oproti PN prechodom. Tento šum je taktiež charakteristický konštantnou spektrálnou hustotou a gaussovským rozdelením pravdepodobnosti napätia. Šumový výstrelový prúd závisí predovšetkým na veľkosti prúdu PN prechodom. Jeho prúdovú šumovú hustotu je možné vypočítať ako:

$$i_n = \sqrt{2 \cdot q \cdot I_{dc}} \quad (1.2)$$

kde q je náboj elektrónu a I_{dc} je jednosmerný prúd PN prechodom. Z rovnice vyplýva, že jediný parameter, ktorým je možné ovplyvniť veľkosť výstrelového šumu je prúd [1].

1.2.3 Šum 1/f

Vyznačuje sa klesajúcim spektrom smerom k vyšším frekvenciám. Vzniká vplyvom nedokonalostí a fluktuácií v kryštálických mriežkach polovodičov [4]. Je akýmsi nadbytočným šumom generovaným súčiastkou, popri tepelnom a výstrelovom šume. Vo všeobecnosti sa vyskytuje vo veľa rôznych procesoch v prírode. Je jedným z farebných šumov, ktoré nemajú konštantné spektrum, ale sú frekvenčne závislé. Taktiež sa v časovej oblasti nespráva podľa gaussovského rozdelenia[1].



Obr. 1.4: Porovnanie časových priebehov šumov: hore biely šum, v strede červený šum, dole šum $1/f$ [1]

1.3 Parametre pre popis šumových signálov

Šum je potrebné vyjadriť pomocou fyzikálnych veličín. Okrem šumového výkonu, prúdu a napätia pre popis šumových signálov existujú presne na to určené veličiny, ktoré špecificky vyjadrujú mieru šumu vo vzťahu k iným veličinám.

1.3.1 Pomer SNR

Pomer signál-šum (SNR) je kľúčový ukazovateľ kvality signálu v komunikačných a signálových systémoch, vyjadrujúci pomer medzi výkonom signálu a výkonom šumu [4].

$$SNR = 20 \cdot \log (U_s/U_N) \quad (1.3)$$

1.3.2 Šumový faktor

Šumový faktor alebo takzvaný Noise Factor (F) kvantifikuje degradáciu signálu spôsobenú šumom v elektronickom zariadení, ako je napríklad zosilňovač. Vypočíta sa ako pomer vstupného signál-šum pomeru SNR_1 k výstupnému SNR_2 [4].

$$F = \frac{SNR_1}{SNR_2} \quad (1.4)$$

1.3.3 Šumové číslo

Šumové číslo alebo Noise Figure (NF) je ďalším spôsobom vyjadrenia šumového faktoru, zvyčajne udávaný v decibeloch nasledovne [4]:

$$NF = 10 \cdot \log(F) \quad (1.5)$$

1.3.4 Šumová teplota

Šumová teplota je miera, ktorá udáva, pri akej teplote by ideálny rezistor vytvoril rovnaké množstvo šumového výkonu ako dané zariadenie. Je možné ju definovať ako [4]:

$$T_n = \frac{P_n}{k \cdot B}, \quad (1.6)$$

Šumová teplota sa udáva v Kelvinoch a je dôležitým parametrom pri posudzovaní kvality šumových zdrojov. Úzko súvisí s parametrom ENR.

1.3.5 Excess noise ratio

Excess noise ratio (ENR) je pomer medzi výkonom šumu generovaného šumovým zdrojom, keď je zapnutý, a výkonom šumu generovaného, keď je vypnutý. Je možné ho vypočítať pomocou šumových teplôt šumového zdroja ako:

$$\text{ENR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{T - T_0}{T_0} \right), \quad (1.7)$$

kde T je šumová teplota zdroja pri zapnutom stave a T_0 je referenčná teplota pri vypnutom stave [5]. Tento parameter je dôležitý z hľadiska posudzovania zdrojov šumu, nakoľko je podľa neho možné posúdiť, akú mieru prídavného šumu daný zdroj generuje. Bežne sa udáva v katalógových listoch pre šumové diódy.

2 Zdroje šumových signálov

V predchádzajúcej kapitole bol šum definovaný ako nežiadúci jav, vyznačujúci sa špecifickými vlastnosťami v časovej a frekvenčnej oblasti. Tieto vlastnosti je však možné s výhodou využiť v konkrétnych aplikáciách. Príkladom je zisťovanie šumového čísla zosilňovačov. V týchto prípadoch je potrebné generovať šum zámerne, tak aby spĺňal požadovanú výkonovú úroveň a šírku pásma. Z tohto dôvodu existujú zdroje šumového signálu, ktoré sú použité v rozličných komerčných a vedeckých aplikáciách. Nasledujúce podkapitoly budú mať za cieľ priblížiť niektoré súčiastky a zariadenia, ktoré majú potenciál byť použité ako základ šumového zdroja.

2.1 Polovodičové zdroje šumového signálu

Ak PN prechodom polovodičovej súčiastky tečie elektrický prúd, pohybujúce sa elektróny prekonávajú potenciálovú bariéru PN prechodu, čím vzniká výstrelový šum. Nasledujúce polovodičové súčiastky majú predpoklad vytvárať šumový signál pri svojej činnosti.

2.1.1 Zenerová dióda

Zenerové diódy sú v elektronike široko používané pre stabilizáciu napätia. Pracujú na princípe Zenerovho javu. Pri pripojení napätia v závernom smere sa PN prechod nedeštruktívne prerazí v dôsledku kvantového tunelovania elektrónov cez potenciálovú bariéru prechodu a diódou začne pretekať prúd. Tento jav prevláda do napätia okolo 5V. Pri vyšších napätiach prevláda lavínový prieraz, ktorý je spôsobený vplyvom silného elektrického poľa na voľné elektróny, ktoré sú tým urýchľované pričom v dôsledku kolízií s ostatnými elektrónmi lavínovým spôsobom pribúda počet takto urýchlených elektrónov. Výsledkom je záverný prúd PN prechodom. Pri prechode záverného prúdu nastáva tvorba výstrelového šumu. Na rovnakých princípoch pracuje aj šumová dióda, ktorá je špeciálne navrhnutá pre generovanie šumu v širokom frekvenčnom pásme. Jej výstupný šumový signál má symetrické rozloženie napätia bieleho gaussovho šumu pri zachovaní plochej výkonovej spektrálnej hustoty v závislosti od frekvencie. Medzi aplikácie týchto diód patria zabudované testovacie zariadenia alebo dithering na zvýšenie dynamického rozsahu A/D prevodníkov. Šumové diódy sú vyrábané v SMD puzdrách SOD-323, D0-35 alebo ďalších [6], pre potlačenie parazitných vlastností, ktoré by mohli mať vplyv na výstupnú plochú frekvenčnú charakteristiku.

2.1.2 Prechod tranzistoru emitor-báza

Ak je zapojený bázovo-emitorový prechod tranzistora v závernom smere, pri určitom napätí na ňom vznikne nedeštruktívny prieraz zapríčinený lavínovým javom. Pri prieraze tečie bázovo-emitorovým prechodom záverný jednosmerný prúd tranzistorom a v prechode sa opäť generuje výstrelový šum, podobne ako aj v diódach [7].

2.2 Ďalšie zdroje šumového signálu

2.2.1 Tepelný šum na rezistore

Pri pripojení napätia na rezistor s určitým odporom v uzatvorenom obvode začne rezistorom tiecť elektrický prúd, ktorý spôsobí zahriatie rezistora z dôvodu rezistívnych strát. Z dôvodu zvýšenej teploty sa v rezistore generuje zvýšená hladina tepelného šumu. Tento spôsob vytvárania šumu sa používa napríklad v generátoroch náhodných signálov, kde sa na základe stochastických napätových hodnôt šumového signálu generuje náhodná sekvencia čísel [1].

2.2.2 Vakuová dióda

Vakuová dióda je elektronická súčiastka, ktorá obsahuje dve elektródy, katódu a anódu, ktoré sú umiestnené vo vákuovej sklenenej banke. Vákuum umožňuje voľné pohyby elektrónov medzi katódou a anódou bez interferencie s molekulami plynu. Po pripojení napätia sa katóda zahrieva, čím sa elektróny uvoľňujú z jej povrchu v procese známom ako termoemisija. Uvoľnené elektróny sa pohybujú smerom k anóde cez vákuum čím vytvárajú elektrický prúd. V dôsledku tejto termoemisie vzniká vo vákuovej dióde výstrelový šum. Týmto spôsobom sa vákuové diódy používali na generovanie šumu vo ferkvenčnom pásme od niekoľkých kilohertzov do stoviek megahetrozov [8].

2.2.3 Plynová výbojka

Plynová výbojka je elektrický zdroj svetla, ktorý pracuje na princípe elektrického výboja v plyne. Po pripojení napätia na výbojku sa plynovom vzniknutého elektrického poľa ionizuje plyn v trubici, a tým sa stáva vodivým. V dôsledku toho v trubici vzniká výboj elektrického prúdu v podobné urýchlených voľných elektrónov, ktoré následne urýchľujú ďalšie elektróny pri zrážkach s atómami. Urýchľované elektróny emitujú elektromagnetické žiarenie podobne tomu od tepelného zdroja šumu [9]. To má za následok tvorbu šumového signálu. Niektoré plynové výbojky dosahujú parameter ENR až okolo 15 dB [10].

3 Šumové elektromagnetické pole

3.1 Vlastnosti šumového poľa

Ako bolo spomenuté v prvej kapitole, šumový prúd je stochastickej povahy. Ak by sme pripojili do obvodu, v ktorom tečie šumový prúd anténu, energia obvodu by bola vyžiarená do priestoru v podobe elektromagnetických vln. V prípade šumového prúdu bude mať vygenerované elektromagnetické pole stochastický charakter. Takéto pole, ktoré nemá pevne stanovenú amplitúdu ani frekvenciu, sa podobá bielemu nepolarizovanému svetlu. Biele svetlo je zmesou všetkých farieb. Má teda spektrum s určitou šírkou pásma. Zo stochastického charakteru vlnenia vyplýva, že šumové pole nemá presne danú amplitúdu a frekvenciu, čím nemôže vytvoriť konštruktívnu alebo deštruktívnu interferenciu s ostatnými vlnami. Demonštrovať tento jav by sa dalo zavedením paralely s Youngovým pokusom, ktorý bol vykonaný začiatkom 19. storočia. Tento experiment ukázal, že elektromagnetická vlna s presne danou frekvenciou sa ohýba prechodom cez štrbiny a následne interferuje sama so sebou. Na tienidle sa v dôsledku tohto javu vytvoria tmavé a biele pruhy. Tieto pruhy zobrazujú maximá a minimá intenzity elektrického poľa interferujúcich vln [11]. V komunikačnej technike predstavuje interferencia vlnenia problém, pretože iniciuje vznik stojatej vlny. Ak je prijímač umiestnený v mieste minima stojatých vln, zachytáva signál s útlmom. Interferencia v prenosovom kanáli vzniká sčítaním dvoch alebo viacerých vln, ktoré sú odrazené od okolitých objektov a stretávajú sa v určitých bodoch priestoru. Ak nahradíme monochromatické svetlo v Youngovom pokuse nekoherentným bielym svetlom so spektrom zložiek zistíme, že k interferenciám dochádza, ale tienidlo je rovnomerne osvetlené a nevznikajú tmavé a svetlé pruhy. Interferencia sa prejaví iba jasom zobrazeného svetla vytvoreným interferujúcimi vlnami. Jediný relevantný údaj je teda intenzita osvetlenia tienidla [12]. Prakticky to znamená absenciu interferenčných maxím a miním. Z tejto skutočnosti vyplýva, že použitie šumu v komunikačnej technike by mohlo zlepšiť príjem signálu. Pri prijímaní rádiového signálu často dochádza k útlmu spôsobenému stojatým vlnením. Šíriaca sa priama vlna od vysielateľa a odrazená vlna od okolitých objektov v mieste prijímateľa interferujú, pričom sa stretávajú navzájom fázovo posunuté z dôvodu prechodu rozdielnymi dráhovými úsekmi. Následne vzniká v miestach stretu stojaté vlnenie. Ak je prijímač umiestnený práve v mieste uzlu stojatej vlny, prijímaný signál bude utlmený oproti signálu v kmitni stojatej vlny. V prípade použitia šumu by mohol byť prijímač umiestnený nezávisle na polohe v priestore, nakoľko nevznikne podľa Youngovho pokusu stojaté vlnenie v určitej stálej forme, a teda ani uzly tohto vlnenia, kde by mohol byť signál konštantne utlmený. Meraním a posudzovaním vyžiareného elektromagnetického poľa sa zaoberá rádiometria.

3.2 Vznik šumového poľa

Pri pripojení šumového prúdu na anténu, bude anténa následne generovať šumové elektromagnetické pole. Anténa pre tento účel nemá špeciálne obmedzenie, ale niektoré typy antén sú vhodnejšie pre vybudenie šumového poľa. Efektívna hodnota prúdu výstrelového šumu závisí na šírke pásma. Čím väčšia šírka pásma, tým väčšia je efektívna prúdová hustota. Je teda na mieste uvažovať nad širokopásmovými anténami. Pre tento účel je možné využiť viacero typov širokopásmových antén.

3.2.1 Dipólová anténa

Dipólová anténa je najjednoduchšia lineárna anténa. Tvoria ju dva vodiče umiestnené v jednej osi. Typicky sa v rádiových aplikáciach uvažuje polvlnný alebo štvrtvlnný dipól. Polvlnný dipól má ziska 2,15 dB oproti všesmerovej anténe. Samotná dipólová anténa s tenkým vodičom nieje sama o sebe širokopásmová a teda nieje ani vhodná pre vytvorenie šumového poľa. Jej šírka pásma však rastie hrúbkou použitých vodičov a pri určitých geometrických modifikáciách dosahuje lepšej šírky pásma.

3.2.2 Bikonická anténa

Bikonická anténa je širokopásmová anténa, ktorá pozostáva z dvoch kuželov (kónusov) umiestnených špicami proti sebe. Jedná sa o obdobu dipólovej antény. Bikonické antény sú navrhnuté tak, aby pokrývali široké frekvenčné spektrum, čo ich robí vhodnými pre rôzne aplikácie vrátane meraní elektromagnetických vln.

3.2.3 Bow-tie anténa

Bow-tie (motýliková) anténa je typ širokopásmovej antény, ktorá získala svoj názov podľa tvaru pripomínajúceho motýlik. Je to taktiež obdoba širokopásmového dipólu. Oproti bikonickej anténe sa líši konštrukčne. Bow-tie anténa je plošná anténa pozostávajúca z dvoch trojuholníkových vodivých plôch vytlačených na plošnom spoji, ktoré su umiestené jedným vrcholom oproti sebe, pričom je k tomuto vrcholu pripojené napájacie vedenie.

3.2.4 Lievikova antena

Lieviková (horn) anténa je typ smerovej antény, ktorá sa často používa v mikrovlnných frekvenciách. Tieto antény majú lievikovitý tvar, ktorý sa rozširuje smerom von od zdroja signálu. Je viacero typov lievikových antén, ktoré sa líšia tvarom. Najjednoduchším typom je otvorené ústie vlnovodu. Následne je obdĺžnikova lieviková anténa, ktorá má tvar na konci rozširujúceho sa vlnovodu s obdĺžnikovým tvarom. ďalej môže

byť kruhová lieviková anténa, ktorá má ústie v tvare kruhu. Ďalšou menej obvyklou modifikáciou je lastúrová anténa a ďalšie antény. Výhodou tejto antény oproti dipólovým anténam je väčšia smerovosť a konštrukčná pevnosť.

3.3 Využitie šumových polí

Využitie šumového signálu nieje v rádiotechnickej praxi veľmi časté. Používa sa však v určitých aplikáciách, napríklad v meraní prenosových charakteristík dvojbranov, alebo taktiež pri kalibrácii detektorov či rádiometrov. Taktiež pri meraní šumového čísla zosilňovačov. Avšak použitie elektromagnetického žiarenia s veľmi podobnými vlastnosťami ako šumový signál, je možné nájsť vo vyššej časti frekvenčného spektra a v inom odbore. V medicíne sa nízko-koherentné optické žiarenie používa na diagnostiku očných chorôb, pomocou techniky optickej koherenčnej tomografie (OCT). Optická koherenčná tomografia je založená na interferenciách elektromagnetického žiarenia v infračervenej oblasti spektra. Ako zdroj žiarenia je použitý infračervený nízko-koherentný laser, ktorý preniká približne 2 mm do hĺbky materiálovej štruktúry. Rozlišovacia schopnosť OCT je 2 až 15 μm a je daná koherenčnou dĺžkou laserového zdroja. Tá sa vypočíta podľa vzťahu [7]:

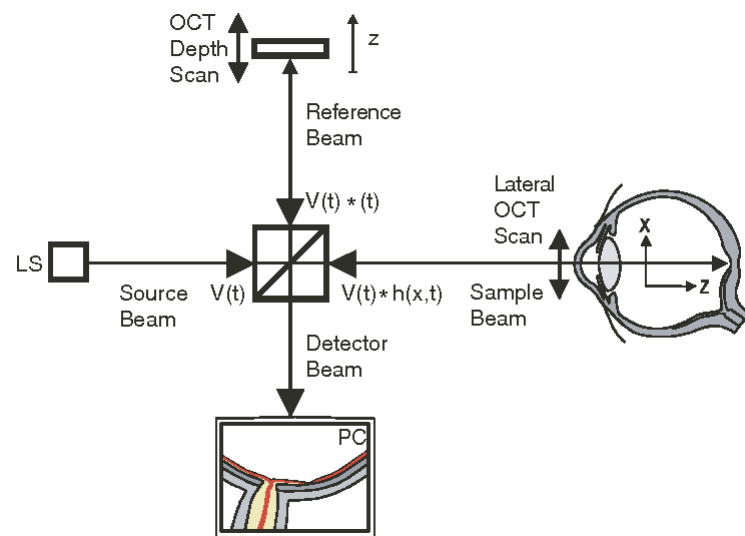
$$L_c = \frac{0,44\lambda}{\Delta\lambda} \quad (3.1)$$

kde λ je vlnová dĺžka centrálnej frekvencie žiarenia a $\Delta\lambda$ je spektrálna šírka svetelného zdroja. Nízka koherencia sa používa práve pre dosiahnutie malej koherenčnej dĺžky a to tým, že sa buď použije nekoherentný zdroj žiarenia, alebo koherentný zdroj, ktorý vyžaruje svetelné lúče v pulzoch s určitou frekvenciou.

Pre mechanizmus vzniku interferencie sa používa Michelsonov interferometer, ktorý pracuje s nízko-koherentným laserom, sústavou zrkadiel a skúmaným objektom. Nízko-koherentný laser vyžaruje infračervené žiarenie na polopriepustné zrkadlá naklonené v uhle 45 deg. Časť žiarenia sa od zrkadiel odrazí do referenčného zrkadla a časť prejde smerom ku skúmanej vzorke. Žiarenie preniká do určitej hĺbky vzorky, pričom sa odráža od každého hĺbkového elementu vzorky. Odrazené žiarenie je následne ovplyvnené danou vrstvou tkaniva, od ktorej sa odráža. Ak má vrstva dostatočne veľkú odrazivosť, veľká časť žiarenia sa od nej odrazí. V prípade vysokej priepustnosti bude odrazené žiarenie viacej utlmené. Odrazené žiarenie od vzorky aj od referenčného zrkadla sa šíri naspäť ku polopriepustnému zrkadlu. Tam tieto dve žiarenia spolu interferujú. Toto interferované žiarenie sa následne šíri ku detektoru žiarenia, kde je následne transformované do formy elektrického signálu a spracované počítačovým programom. Aby mohli nastať interferenčné javy, odrazené žiarenia z oboch objektov musia byť vo fáze. To znamená, že musia prejsť rovnakú dráhu od

polopriepustných zrkadiel k objektu a naspäť. Posuvom referenčného zrkadla bližšie alebo ďalej na osi kolmej na referenčné zrkadlo sa dá doceliť že odrazené žiarenie prejde rovnaký dráhový úsek, ako aj žiarenie, ktoré je odrazené od rovnako dlhého hĺbkového úseku skúmanej vzorky. Takýmto spôsobom je možné skenovať hĺbkový profil vzorky. Najmenší krok je daný vyššie spomenutou koherenčnou dĺžkou, v ktorej sa dá žiarenie vyslané od zdroja považovať za koherentné. Princíp je znázornený na Obr. 3.1.

OCT je používaná pre diagnostiku nádorov alebo zisťovanie porúch oka. Má však svoje uplatnenie aj v industriálnych sférach v oblasti detailného skúmania povrchu materiálov [13].



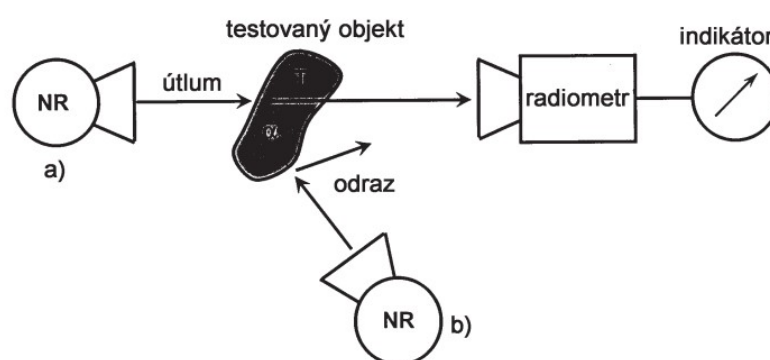
Obr. 3.1: Princíp optickej koherenčnej tomografie [13]

4 Mikrovlnná rádiometria

4.1 Rádiometria a jej aplikácie

Ako už bolo spomenuté, rádiometria je vedecká disciplína zaoberajúca sa meraním elektromagnetického žiarenia. Meranie sa uskutočňuje príjmom a následným spracovaním elektromagnetických vln šíriacich sa zo zdroja žiarenia. Podľa spôsobu merania rozdeľujeme rádiometriu na aktívnu a pasívnu. Pri pasívnej rádiometrii sa merajú vlastnosti žiarenia tvorené objektom, ktorý je zdrojom žiarenia. Pri aktívnej rádiometrii je objekt, ktorý nemusí byť sám o sebe zdrojom žiarenia, aktívne ožarovaný externým zdrojom určitého elektromagnetického poľa. Pole interaguje s objektom a šíri sa od objektu mechanizmami šírenia elektromagnetickej vlny. Následne je merané prijímačom. Účelom aktívneho ožarovania môže byť zistenie vlastností daného žiarenia na objekt po interakcii s objektom, alebo zisťovanie vlastností samotného ožarovaného objektu [14]. Prijímacie zariadenie sa v rádiometrii nazýva rádiometer. Ako napovedá názov, mikrovlnná rádiometria sa zaoberá meraním vyžarovania v mikrovlnnom pásme, teda of frekvencie 300 MHz až do 300 GHz. V tejto časti frekvenčného pásma žiarenie inak interaguje s objektami, než ako pri nižších frekvenciách do 300 MHz. Princípy šírenia elektromagnetických vln zostávajú rovnaké, avšak s rastúcou frekvenciou sa menia vlastnosti objektov, na ktoré žiarenie dopadá. Práve skúmanie týchto vlastností je jednou z aplikácií mikrovlnnej rádiometrie. Ďalšími typickými aplikáciami je skúmanie mimozemského žiarenia, čím sa zaoberá rádioastronómia alebo poveternostných podmienok na Zemi, rôznymi klimatickými meraniami a podobne.

Aby bolo možné porozumieť nameraným dátam, je potrebné rozumieť šíreniu elektromagnetického žiarenia.



Obr. 4.1: Aktívna rádiometria [10]

Elektromagnetické žiarenie sa šíri priestorom od zdroja žiarenia. Pri uvážení, že zdrojom je jeden bod v priestore, potom sa bude elektromagnetická vlna vyžarovaná

týmto bodom šíriť v tvare guľovej plochy, ktorej polomer sa v čase a priestore zväčšuje. Po prekonaní dostatočne veľkej vzdialenosti povrchu vlny od zdroja bude polomer guľovej plochy taký veľký, že z pohľadu prijímacieho zariadenia môže byť zakrivenie gule zanedbané, a je možné uvažovať namiesto guľovej vlny rovinnú vlnu. Oblasť, v ktorej je táto úvaha aplikovaná, je tzv. vzdialená alebo Fraunhoferova zóna. Aby sa prijímač nachádzal vo Fraunhoferovej zóne, musí jeho vzdialenosť d spĺňať podmienku [?]:

$$d > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

kde D je najväčší rozmer antény a λ je vlnová dĺžka. Tento vzťah platí pre antény, kde $D > \lambda$. Ak je však $\lambda > D$, vzťah sa modifikuje do tvaru [?]:

$$d > \frac{2D^2}{\lambda} + \lambda \quad (4.2)$$

Priestor, v ktorom sa vlna šíri, môže byť voľným priestorom (vákuum), alebo môže byť vyplnený určitým materiálom. Z pohľadu elektromagnetickej vlny môže byť každý materiál popísaný tromi základnými materiálovými konštantami: permitivita ϵ , permeabilita μ a konduktivita ρ [15]. Tieto konštanty majú vplyv na šírenie vlny v danom prostredí. Pri šírení sa uplatňuje Huygensov princíp, z ktorého vyplývajú základné mechanizmy šírenia vln v jednom prostredí, alebo na rozhraniach viacerých prostredí. Pri dopade vlny na rozhranie dvoch alebo viacerých materiálovo odlišných prostredí, môže nastať odraz od rozhrania alebo môže vlna prejsť cez rozhranie a šíriť sa hlbšie do druhého prostredia. V reálnom svete je najčastejšia kombinácia týchto dvoch javov v určitom pomere. Prechod cez rozhranie je sprevádzaný lomom vlny pod určitým uhlom. Uhol lomu určuje Snellov zákon lomu, ktorý je daný pomerom [15]:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (4.3)$$

kde α je uhol dopadu, β je uhol lomu, n_2 a n_1 sú absolútne indexy lomu prostredí a v_2 , v_1 sú fázové rýchlosti elektromagnetickej vlny v daných prostrediach. Z vyššie uvedeného zákona vyplýva previazanosť medzi uhlom lomu a absolútnym indexom lomu prostredí.

Absolútny index lomu je možné vypočítať pomocou materiálových konštant nasledovne [15]:

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (4.4)$$

kde μ_r je relatívna permeabilita a ϵ_r relatívna permitivita prostredia a taktiež pomocou pomeru rýchlostí vlnenia vo vákuu c a v danom materiáli nasledovne:

$$n = \frac{c}{v} \quad (4.5)$$

Z vyššie uvedených vzťahov vyplýva, že index lomu je závislý na materiálových konštantách a taktiež na fázovej rýchlosti vlny v materiáli. Fázová rýchlosť vlny je daná vzťahom:

$$v = \lambda \cdot f \quad (4.6)$$

Po dosadení vyššie uvedených vzťahov do Snellovho zákona bude zrejmá závislosť uhla lomu na konkrétnych vlastnostiach materiálu a na frekvencii dopadajúcej vlny. Zákon odrazu hovorí, že uhol odrazu je vždy rovnaký ako uhol dopadu. Oba tieto zákony hovoria o uhloch vlny po interakcii s rozhraním, avšak nehovoria o kvantite odrazenej alebo prenesenej energie vlny na rozhraní. Túto kvantitu popisujú ďalšie vlastnosti, ktoré priamo vyplývajú z odrazu a lomu na rozhraní. Je to odrazivosť a priepustnosť materiálu.

Odrazivosť je definovaná ako pomer intenzity odrazeného elektrického poľa E_{ref} ku intenzite dopadajúceho elektrického poľa E_{inc} [15]:

$$r = \frac{E_{ref}}{E_{inc}}. \quad (4.7)$$

Pre praktické aplikácie je však potrebné určiť odrazivosť konkrétnejšie, pomocou vlastností materiálov. Takéto vyjadrenie nájdeme vo Fresnelových rovniciach, ktoré definujú odrazivosť pomocou absolútnych indexov lomu prostredia, príslušných uhlov a pre s -polariáciu alebo p -polarizáciu dopadajúcej vlny nasledovne[15]:

$$r_s = \left(\frac{n_1 \cos(\alpha) - n_2 \cos(\beta)}{n_1 \cos(\alpha) + n_2 \cos(\beta)} \right)^2 \quad (4.8)$$

$$r_p = \left(\frac{n_1 \cos(\beta) - n_2 \cos(\alpha)}{n_1 \cos(\beta) + n_2 \cos(\alpha)} \right)^2 \quad (4.9)$$

, kde n_1 je index lomu prostredia v ktorom vlna dopadá, n_2 je index lomu prostredia, do ktorého sa vlna láme, α je uhol odrazu a β je uhol lomu. Ak je svetlo nepolarizované, celkovú odrazivosť môžeme zapísať ako[15]:

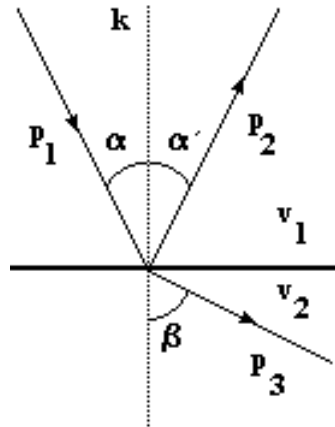
$$r_{tot} = \frac{r_s + r_p}{2} \quad (4.10)$$

Pri kolmo dopadajúcom žiarení na rozhranie sa polarizácie a uhly neprejavajú. Preto sa vzťah (4.10) zjednoduší pre oba prípady na:

$$r_{tot} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (4.11)$$

Pomocou odrazivosti môžeme následne určiť celkovú priepustnosť na rozhraní, ktorá bude daná vzťahom[15]:

$$t_{tot} = 1 - r_{tot} \quad (4.12)$$



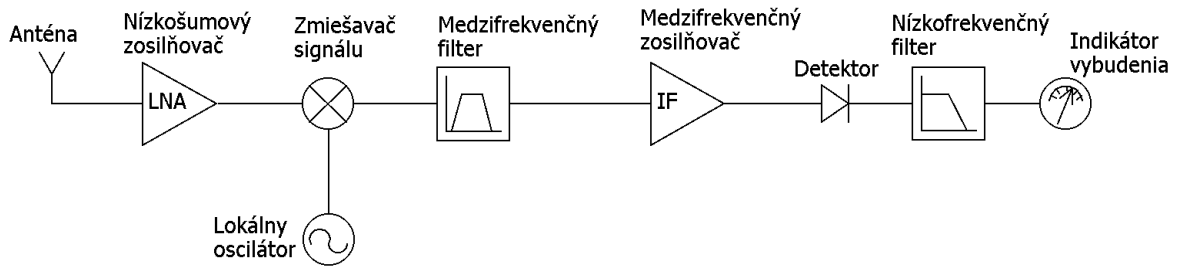
Obr. 4.2: Odraz a lom svetla [16]

Znázornenie odrazu a lomu elektromagnetickej vlny vo forme lúčov je vidieť na Obr.4.2

Vlna sa šíri po prechode rozhraním hlbšie do daného média, pričom interaguje s jeho časticami. Nastáva postupný útlm intenzity žiarenia, kde sa určitá časť energie vlny mení na teplo [17]. Dá sa všimnúť, že miera účinku všetkých vyššie popísaných mechanizmov šírenia elektromagnetických vln v materiály a na rozhraní materiálov závisí od materiálových konštánt konkrétneho materiálu a frekvencie dopadajúcej vlny. Znamená to, že vlna po interakcii s materiálom nesie určitú informáciu o jeho vlastnostiach. Ak bolo možné túto vlnu zachytiť a vhodným spôsobom spracovať, mohli by sa pomocou žiarenia skúmať vlastnosti materiálov, tak ako to uvádza definícia rádiometrie. Prístroj, ktorý plní tento účel sa nazýva rádiometer. Zachytáva žiarenie po interakcii s materiálom, ktorý bol aktívne ožarovaný, alebo žiarenie objektu samotného. Zachytená elektromagnetická vlna sa v obvodoch rádiometra transformuje na elektrický signál vo vedení.

4.2 Mikrovlnný rádiometer

Rádiometer je základnou časťou rádiometrického meracieho systému. Rádiometre môžu mať rôznu konštrukciu v závislosti od frekvenčného pásma, na ktorom pracujú. Medzi tie, ktoré pracujú v rádiovnej oblasti spektra patria mikrovlnné rádiometre. Základný typ mikrovlnného rádiometra je rádiometer celkového výkonu. Na vstupe anténu, ktorá je navrhnutá pre príjem požadovaného žiarenia. Od antény je vyžadovaný dostatočný zisk v určenom smere, vhodná šírka pásma a centrálna pracovná frekvencia. Po anténe je v obvode zapojený ako prvý blok nízkošumový zosilňovač. Je potrebný z dôvodu nízkych úrovní prijímaných signálov. Jeho výhodou je nízky prídavný šum



Obr. 4.3: Principiálna schéma mikrovlnného rádiometra

k zosilnenému vstupnému signálu. Na kvalite tohoto zosilňovača do veľkej miery závisí celkový šum v obvode pretože celkové šumové číslo obvodu najviac závisí na prvom bloku reťazca tak, ako to definuje Friisov vzťah. Preto sa pre tento zosilňovač používajú špeciálne tranzistory [4]. Následne je zosilnený signál pripojený na vstup zmiešavača, ktorý konvertuje signál na nižšiu frekvenciu, do medzifrekvenčného pásma. Táto technika je zavedená z dôvodu vysokého útlmu prijatého vstupného signálu, ktorý je potrebné zosilniť. Na nižšej frekvencii je možné použiť komerčné zosilňovače, čo by nebolo možné ak prijíma rádiometer signály rádov desiatok GHz [18]. Signál v medzifrekvenčnom pásme je následne filtrovaný pásmovou priepustou, ktorá prepustí len požadovaný rozsah prijímaného spektra signálu a odstráni nechcené intermodulačné zložky vzniknuté zmiešavaním. Nasleduje medzifrekvenčný zosilňovač, ktorý zosilní filtrovaný medzifrekvenčný signál. Nasleduje blok detektoru, ktorý zo striedavého signálu prepustí len pulzujúcu zložku jednej polarizácie, ktorá je filtrovaná v integrátore na jednosmernú strednú hodnotu pulzujúcej zložky. Výsledná jednosmerná zložka je budiacou veličinou indikátoru na výstupe rádiometra. Bloková schéma mikrovlnného rádiometra je na Obr.4.3 [19]. Veľkosť jednosmernej zložky sa mení v závislosti od intenzity prijímaného žiarenia. Tá môže byť vzorkovaná s dostatočne jemným krokom na prevod do digitálnej podoby alebo meraný vhodným meracím prístrojom. Ďalším typom mikrovlnného rádiometra je Dickeho rádiometer, ktorý je v princípe rádiometer celkového výkonu, avšak jeho vstup je prepínaný medzi anténou a známou referenčnou záťažou. Táto technika pomáha zlepšiť presnosť a citlivosť merania pomocou potlačenia šumu, ktorý je do určitej miery eliminovaný prepínaním vstupu. Ďalším rozšírením Dickeho rádiometra je rádiometer s injektovaným šumom. Táto technika spočíva v pridávaní známeho šumového signálu na vstup Dickeho rádiometra. Následne sa meria rozdiel medzi vstupným signálom zmiešaním s pridaním šumu a bez neho. Na základe toho je možné presnejšie určiť aký je podiel vstupného signálu, ktorý je meraný [19].

4.3 Použitie šumu v rádiometrií

Rôzne prírodné materiály alebo materiálové štruktúry, ktoré sú vytvorené človekom, sa dostávajú do kontaktu s elektromagnetickým žiarením, či už prirodzene alebo cielene, na základe ľudského podnetu. Príkladmi môžu byť účinky slnečného žiarenia na ľudskú pokožku, prechod komunikačného signálu cez steny budov, alebo interakcia mikrovlnného žiarenia s potravinami v mikrovlnnej rúre. V mnohých prípadoch je potrebné poznať účinky žiarenia v súvislosti s interakciou s rôznymi typmi materiálov. Je preto na mieste zaoberať sa novými spôsobmi a riešeniami v oblasti rádiometrie, ktoré budú schopné dosiahnuť výsledky v neprebádaných oblastiach účinkov elektromagnetického žiarenia. Pri meraní žiarenia rôznych objektov pomocou rádiometrie sa vyskytujú problémy vyplývajúce z pohybu skúmaných telies, alebo stojatých vln. Z aktuálnych poznatkov sa zdá, že pre skúmanie vlastností materiálových štruktúr by mohlo byť použité v aktívnej rádiometrií šumové pole; išlo by o tzv. aktívnu šumovú rádiometriu.

Merací systém aktívnej šumovej rádiometrie sa zakladá na klasickej aktívnej rádiometrii. Rozdielom bude charakter aktívne vysielaného žiarenia, ktorým je skúmaný objekt ožarovaný. V šumovej rádiometrii bude na miesto časovo deterministického signálu použitý stochastický šumový signál. Z teoretických poznatkov o rádiometrii vyplýva, že pomocou aktívneho ožarovania objektu a následnému prijímaniu odrazených alebo preniknutých vln od vzorky materiálu je možné určiť jeho vlastnosti, ako je odrazivosť, priepustnosť alebo útlm[12]. Tento merací systém sa bude zameriavať práve na meranie týchto vlastností. Pre meranie je potrebné navrhnuť zapojenie a konštrukciu zdroja šumu pre vysielanie šumového poľa a tiež šumový rádiometer, ktorý bude schopný prijímať šumové pole po interakcii so skúmaným objektom. Táto práca má za cieľ preskúmať pôsobenie mikrovlnného šumového poľa, preto návrh systému, ktorému budú venované nasledujúce kapitoly, bude ladený v tomto pásme.

Pri šírení elektromagnetickej vlny cez materiál zložený z viacerých rôznych vrstiev interaguje vlna s každou vrstvou osobitne, podľa fyzikálnych vlastností daných vrstiev. Je možné preto uvažovať, že odrazené vlny od každej vrstvy budú vykazovať odlišné správanie[15]. Na základe tejto rozdielnosti boli navrhnuté viaceré techniky snímania profilu materiálovej štruktúry do hĺbky. Postupom času a vývoja technológií je v dnešnej dobe možné zobraziť pomocou rôzneho typu vlnenia (akustické, elektromagnetické) a spracovávaní výsledkov výpočtovou technikou, obrisy pod povrchom materiálu v 2D alebo 3D zobrazení. Príkladom je ultrasonografia alebo už spomínaná optická koherenčná tomografia. Táto úroveň zobrazenia by mohla byť potenciálnym cieľom vývoja aj aktívnej šumovej rádiometrie.

5 Možnosti zvyšovania citlivosti aktívnej šumovej rádiometrie

Pre skúmanie žiarenia rôznych systémov je potrebné aby rádiometer dokázal spracovať aj signály nízkych úrovní, ktoré sa pohybujú na hladine alebo pod hladinou prijímaného šumu. Z princípu aktívnej šumovej rádiometrie vyplýva, že skúmaný objekt je aktívne ožarovaný šumovým elektromagnetickým poľom a následné odrazené alebo prepustené žiarenie od objektu je zachytávané rádiometrom. Aby rádiometer zachytil žiarenia s nízkou intenzitou, či už vplyvom slabého odrazu od objektu alebo vysokého útlmu signálu po prechode objektom, je možné zvýšiť úroveň aktívneho žiarenia, čím sa musí zvýšiť aj úroveň odrazeného alebo prepusteného signálu a tým aj úroveň na vstupe rádiometra. Druhou možnosťou je zvýšiť citlivosť rádiometra, čo znamená znížiť hladinu vlastného šumu, odfiltrovať externý šum alebo implementovať techniky, ktoré dokážu rekonštruovať prijatý signál aj spod hladiny šumu.

5.1 Zvýšenie úrovne žiarenia šumového žiariča

Zvýšenie úrovne zdroja signálu, ktorý dopadá na objekt, je možné pomocou výkonnejšieho vysielacza, alebo zmenšením útlmu, ktorý spôsobuje stratu vyžiarenej energie. Nakoľko druhá možnosť znamená ovplyvnenie podmienok skúmaného, napríklad zmenšením vzdialenosti medzi objektom a vysielacom, čo nieje vždy fyzicky možné, táto podkapitola sa zameria na možnosti zvyšovania výkonu aktívneho žiariča šumu.

5.1.1 Použitie výkonného zdroja šumu

Pre čo najvyšší výkon šumového žiariča je možné použiť ako zdroj šumu prvok, ktorý má čo najvyšší parameter ENR. Medzi prvky s vysokým ENR patria v súčasnosti šumové diódy a komerčné šumové zdroje. Tieto súčiastky a zariadenia sú špeciálne konštruované pre produkciu vyšších hodnôt šumu. Šumové diódy sú vyrábané v rôznych puzdrách, najčastejšie sú však SMD riešenia. Niektoré typy šumových diód sú v Tab. 5.1.

Pri použití šumových diód alebo iného zdroja šumu ja taktiež možné uvažovať nad zosilnením vygenerovaného šumu pomocou mikrovlnného zosilňovača. Mikrovlnný zosilňovač zosilní šum v určitej časti mikrovlnného spektra, čo môže niekoľkonásobne zvýšiť úroveň šumu. dnes sú na trhu rôzne dostupné komerčné riešenia mikrovlnných zosilňovačov, ktoré sú vo forme malých krabičiek, pričom majú len vysokofrekvenčný vstup a výstup, najčastejšie na báze SMA konektoru.

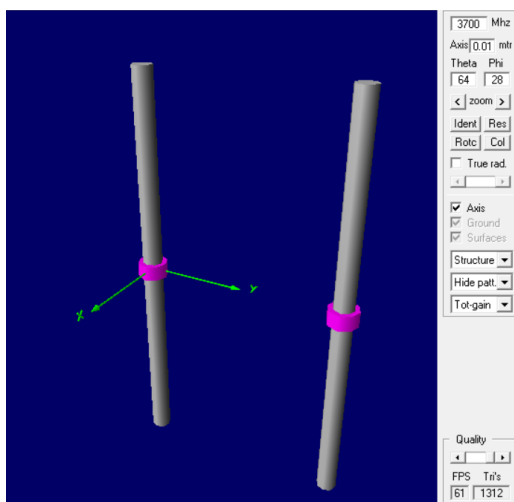
Tab. 5.1: Typy šumových diód, ich ENR a frekvenčný rozsah

Typ šumovej diódy	ENR (dB)	Frekvenčný rozsah (Hz)	Puzdro
NC302	30 - 35	10 Hz - 3 GHz	BL, CH1
NC303	30 - 35	10 Hz - 8GHz	BL, CH1
NC305	29 -34	10 Hz - 11 GHz	BL, CH1
NC401	30 -35	100 MHz - 18 GHz	C10, C50H, CH2
NW301	30 - 35	10 Hz - 3 GHz	SOD-323
NW302	30 - 35	10 Hz - 6 GHz	SOD-323, CH2
NW303	30 - 35	10 Hz - 8 GHz	BL, CH2

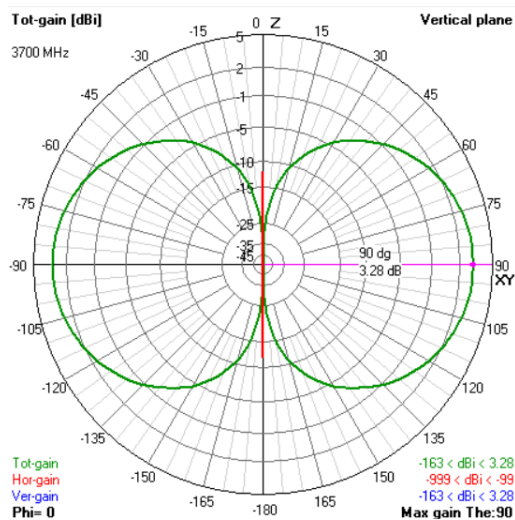
5.1.2 Použitie viacerých žiaričov

Ak nie je možné alebo dostupné použiť súčiastky s vyšším ENR pre budenie antény, ďalšou možnosťou je použitie viacerých menej výkonných šumových zdrojov. Tento princíp je založený na vytvorení anténneho poľa šumových žiaričov, ktoré následne vyžarujú elektromagnetické vlny na rovnaký objekt [20]. V prípade šumového poľa nieje potrebné brať do úvahy interferenciu jednotlivých príspevkov signálov od každej antény tak, aby boli v momente dopadu na skúmaný objekt vo fáze. Vyplýva to z podstaty šumového poľa, ktoré má stochastický charakter a nieje môže dosiahnuť koherenciu vln z viacerých zdrojov. Avšak šumová hustota polí jednotlivých žiaričov sa v mieste objektu superponuje, čo má v konečnom dôsledku za vznik vyššej celkovej úrovne šumu dopadajúceho na objekt [21]. Anténne pole môže byť zložené s rôznych typov antén. Pri použití budenia pomocou periodických signálov je potrebné prispôbiť vzdialenosti medzi anténami, aby mal výsledný anténny systém požadovaný efekt, ktorým je napríklad posilnenie zisku v priamom smere [20]. Na obrázkoch nižšie je ukázaný vplyv použitia dvoch dipólových antén na celkový zisk anténneho systému v porovnaní s jedným dipólom. Porovnanie je spravené s simulačnom programe pre návrh antén 4NEC2. V oboch prípadoch sú dipóly umiestnené vo voľnom priestore a budené kontinuálnym signálom na frekvencii 3700 MHz, umiestnené vedľa seba v rovnakej dĺžke, pozdĺž osy Y. Ako je ukázané na stupnici zisku, dva dipóly majú v tomto prípade o 0,95 dB väčší zisk v priamom smere, ako samostatný dipól. Tento rozdiel je závislý na vzdialenosti dipólov na horizontálnej osi a taktiež frekvenciou budiaceho prúdu. Týmto spôsobom je možné radiť vedľa seba, alebo nad sebou väčší počet antén do väčších celkov a získať tak väčší celkový zisk.

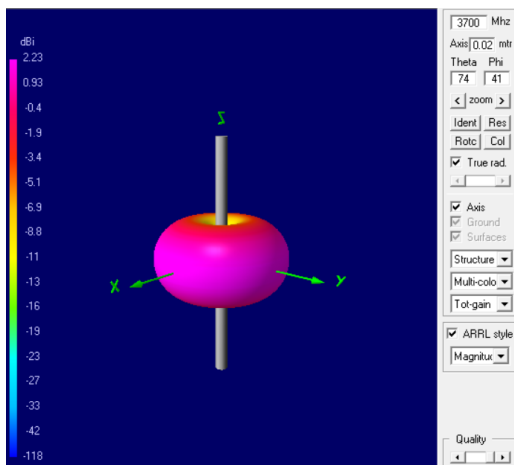
Obr. 5.1: Porovnanie zisku jedného dipólu so ziskom dvoch dipólov



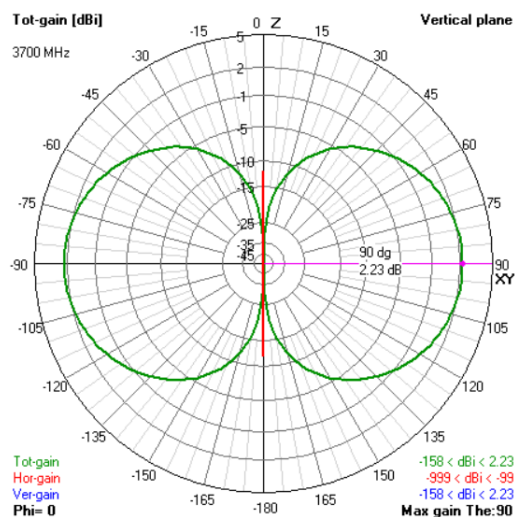
(a) Dva dipóly v voľnom priestore



(b) Vyžarovacia charakteristika dvoch dipólov vo voľnom priestore



(c) Jeden dipól vo voľnom priestore a jeho 3D vyžarovacia charakteristika



(d) Vyžarovacia charakteristika jedného dipólu vo voľnom priestore

5.1.3 Použitie reflektora

Problémom anténneho pola dipólov aj dipólu samotného je takmer všesmerové vyžarovanie. Z obrázkov dipólov vyššie je vidieť, že dipól vyžaruje okrem svojej osy do všetkých smerov. Veľká časť vyžiareného výkonu preto uniká do priestoru, kde to nieje potrebné. Aby bolo možné využiť čo najviac vyžiareného výkonu antény, je potrebné ho čo najviac nasmerovať do oblasti objektu. Pre zvýšenie smerovosti a zisku šumového žiariča v smere oblasti skúmaného objektu je možné použiť reflektor, ktorý odráža žiarenie zo smerov mimo objektu naspäť do smeru, v ktorom je umiestnený skúmaný objekt. Typ antény s reflektorom sa nazýva reflektorová anténa. Ako reflektor môžu byť použité viaceré rôzne štruktúry s vysokou odrazivosťou. Jednoduchý reflektor používaný pri Yagiho anténach je rovný vodič určitej hrúbky, ktorý je umiestnený za aktívny dipól v presne definovanej vzdialenosti. Ďalšou možnosťou je použitie rovnej odrazivej plochy za aktívnym žiaričom. Pre ešte väčšiu smerovosť sa používa zakrivená odrazená plocha na spôsob paraboly, ktorá v prípade prijímača koncentruje odrazený vyžiarený výkon do jedného bodu. V prípade vysielača vytvára rovinnú vlnu z inak guľovej vlnoplochy [20].

5.2 Zvýšenie citlivosti rádiometra

Ako bolo spomenuté vyššie, aby mal rádiometer vyššiu citlivosť musí byť jeho vlastná hladina šumu nižšia, alebo musí byť vybavený technikami pre zvýšenie citlivosti. Znížiť vlastnú hladinu šumu nemusí byť možné, nakoľko tá môže byť ovplyvnená prostredím, kde sa meranie vykonáva, napríklad teplotou alebo externým žiarením z iného zdroja. Preto je efektívnejšie zvýšiť citlivosť rádiometra, pomocou špeciálnej techniky zvanej synchronná detekcia signálu. Pri tejto technike uvažuje kľúčovaný alebo modulovaný prijímaný signál rádiometrom, ktorý je následne po prijatí demoduluje s tým, že modulačný signál je synchronný s demodulačným. V princípe sa klasický detektor v rádiometri nahradí synchronným detektorom. Synchronný detektor pozostáva z klasického detektora a zmiešavača signálov. Ten zmiešava vstupný signál so synchronným demodulačným signálom. Pri tejto technike je prakticky možné detekovať signál, ktorý sa nachádza pod úrovňou šumu [1].

6 Návrh šumového rádiometra

Doterajší text zhrnul základné teoretické poznatky o šume a aktívnej rádiometrii. Na základe týchto poznatkov je možné prejsť k návrhu samotného systému aktívnej šumovej rádiometrie, ktorý by mohol uvedené teoretické informácie overiť experimentálne. Merací systém aktívnej šumovej rádiometrie sa bude zakladať na koncepte klasickej aktívnej rádiometrii. Rozdielom bude charakter aktívneho žiarenia, ktorým bude skúmaný objekt ožarovaný. V šumovej rádiometrii bude na miesto časovo deterministického signálu použitý stochastický šumový signál. Z teoretických poznatkov o rádiometrii vyplýva, že pomocou aktívneho ožarovania objektu a následnému prijímaniu odrazených alebo preniknutých vln od vzorky materiálu je možné určiť jeho vlastnosti, ako je odrazivosť, priepustnosť alebo útlm. Tento rádiometrický systém bude mať za účel práve meranie týchto vlastností pomocou šumového elektromagnetického poľa. Celková koncepcia systému sa nebude veľmi líšiť od klasickej koncepcie aktívnej rádiometrie. Návrh bude pozostávať z dvoch častí systému, šumového žiariča pre aktívne ožarovanie a rádiometra schopného prijať šumový signál. Ako prvá časť bude diskutovaný návrh šumového rádiometra, ktorý je najkomplexnejšou časťou systému. Od neho sa následne bude odvíjať návrh šumového žiariča.

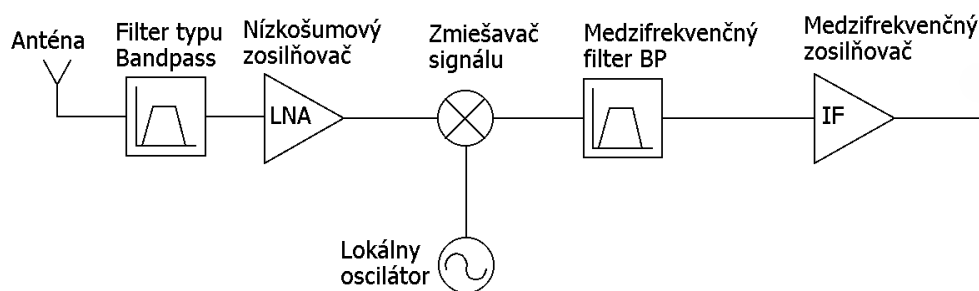
6.1 Znižovací konvertor frekvencie

Pokiaľ nie je na vstupe rádiometra zapojený nízkošumový zosilňovač, prvým blokom rádiometra po prijatí signálu anténou je znižovací konvertor frekvencie, ktorý konvertuje prijatý signál do nižšieho frekvenčného pásma. Návrh elektrického riešenia konvertoru prekračuje rozsah tejto práce, preto bude pre túto časť návrhu použité komerčne dostupné riešenia, ktorého parametre sú garantované výrobcom.

Kvalitné mikrovlnné konvertory pracujúce v širokom frekvenčnom pásme, od stoviek MHz do desiatok GHz, napríklad od firmy Rhode&Schwartz. Ich cena sa však pohybuje v tisíckach Eur a preto bude v systéme použitý konvertor, ktorý je cenovo dostupnejší. V cenovej relácii desiatkach Eur sa pohybuje satelitný LNB (Low noise block) konvertor, ktorý je ľahko dostupný v elektropredajňach a používa sa bežne s každým satelitným prijímačom. Toto riešenie sa javí ako dobrá voľba z pohľadu ceny a kvality. LNB konvertor má v sebe zabudovanú prijímaciu anténu, čím je návrh vstupnej antény prakticky vyriešený. Ďalej, ako obsahuje aj vstupný nízkošumový zosilňovač a výstupný medzifrekvenčný zosilňovač čím odpadnú ďalšie komplikované časti návrhu. Pri tomto riešení bude ďalej potrebné navrhnuť už len detektor a nízkofrekvenčný filter. Na výstupe filtra by malo byť následne možné pozorovať úroveň jednosmerného signálu osciloskopom alebo iným meracím zariadením.

Po zvolení LNB konvertoru pre príjem mikrovlnného šumu je potrebné bližšie špecifikovať jeho vlastnosti a konkrétny typ. LNB konvertor slúži na príjem satelitného signálu a je nevyhnutnou súčasťou satelitnej televízie. Existuje viacero typov LNB konvertorov pracujúcich v rôznych frekvenčných pásmach, ako je C, Ku alebo Ka pásmo. V Európe je najpoužívanejší univerzálny LNB konvertor pracujúci v Ku pásme, ktoré je rozdelené do dvoch subpásiem: 10,7 GHz až 11,7 GHz (spodné pásmo) a od 11,7 GHz do 12,7 GHz (horné pásmo). Toto rozdelenie sa zaviedlo z dôvodu, že šírka pásma vstupného signálu je väčšia ako šírka pásma konvertovaného signálu na výstupe, ktoré je rozdelené nasledovne: 950 MHz až 1950 MHz je rozsah dolného pásma a 1100MHz až 2150 MHz je rozsah horného pásma . Medzi týmito pásmami je možné prepínať prostredníctvom 22 kHz signálu, ktorý je nasuperponovaný na napájacie jednosmerné napätie pre LNB. Ak konvertor zachytí signál v napájaní, prijíma v hornom pásme, absencia signálu znamená príjem v spodnom pásme. Pomocou veľkosti napájacieho napätia je tiež možné meniť príjem signálu s vertikálnou alebo horizontálnou polarizáciu[22]. V rozsahu 12 V až 15 V je nastavená vertikálna polarizácia a od 15 V do 18 V je nastavený príjem horizontálnej polarizácie. Tieto nastavenia robí sám satelitný prijímač, ktorý vyhodnocuje prijímaný signál a nastavuje najlepšiu možnú konfiguráciu [23]. Na komerčnom trhu je množstvo LNB konvertorov líšiacich sa rôznymi parametrami. Základné parametre pre LNB sú:

- počet vstupov - sú dostupné riešenia s dvomi, štyrmi alebo ôsmymi výstupmi
- šumové číslo
- konverzný zisk
- frekvenčné pásmo - najviac používané sú v S, C, Ku a Ka pásmach



Obr. 6.1: LNB konvertor bloková schéma

Bloková schéma LNB konvertoru je na Obr.6.1. Vstup LNB konvertoru tvorí lieviová kruhová anténa. Po nej nasleduje pásmový filter, ktorý filtruje všetky ostatné signály okrem pracovného pásma. Filtrovaný signál vstupuje do nízkošumového zosilňovača a z neho následne postupuje do zmiešavača, ktorý zmiešava vstupný signál so signálom

z integrovaného lokálneho oscilátora. Výsledkom je signál v medzifrekvenčnom pásme, ktorý je filtrovaný druhým pásmovým filtrom, pre odstránenie frekvenčných zložiek po zmiešavaní. Po ňom nasleduje medzifrekvenčný zosilňovač a výstup s F-konektorom, ktorý má charakteristickú impedanciou 75Ω . Týmto koaxiálnym vedením je zároveň konvertor napájaný jednosmerným napätím z televízneho prijímača, pričom prúdový odber býva do cca 200 mA [23].

LNB konvertor má nízke šumové číslo, typicky nízke jednotky dB [22], čo je dôležité, nakoľko je prijímaný signál zo satelitu vplyvom veľkej vzdialenosti a atmosféry značne utlmený a mohlo by dochádzať ku stratám informácie.

Ďalší parameter je konverzný zisk, ktorý je dôležitý pre ďalšie spracovanie signálu. Čím väčší zisk konvertor má, tým menšie nároky sú vyžadované na citlivosť ostatných obvodov, ktoré budú ďalej spracovávať signál. Prehľad niektorých vybraných konvertorov je v Tab.6.1.

Model	pásmo	NF(dB)	Zisk(dB)	f_{out} (MHz)	f_{in} (GHz)
Inverto Black Ultra	Ku	0.2	60	950-2150	10.70-12.75
Televes 7475	Ku	0.3	58	950-2150	10.70-12.75
Maximum XO-11	Ku	0.1	52-63	950-1950	10.70-12.75
Norsat 5150F	C	0.2	62	950-1750	3.4-4.2
Turbo-4200-CK10	C/Ku	0.4	65/60	950-1750/950-2150	3.4-4.2/10.7-12.75
ACLNBP-Ka LNB	Ka	1.3	60	950-2000	20.2-21.2
Norsat 9000HA	Ka	1.4	65	950-1950	18.2-19.2

Tab. 6.1: LNB konvertory a ich parametre

Na voľbe LNB konvertora prakticky závisí návrh šumového žiariča, ktorý bude musieť byť schopný vyžarovať mikrovlnný šum v pracovnom pásme LNB konvertora. Pri Ku a Ka pásme je potrebné sa vysporiadať s relatívne vysokou frekvenciou pri návrhu šumového žiariča. Z pohľadu strát vo voľnom priestore je použitie vyššej frekvencia viacej stratové a taktiež náchylnejšie na parazitné väzby s okolitými objektami v dôsledku parazitných kapacít a indukčností. Z týchto dôvodov bol vybraný konvertor v C pásme Turbo-4200-CK10, od firmy PBI, ktorý pracuje v pásme C. Tento konvertor má aj Ku výstup, avšak tento konektor nebude používaný pri experimentálnom overení. Voľba LNB konvertora vymedzila šírku pásma v ktorej sa bude pohybovať prijímaný mikrovlnný šum. LNB konvertor bude mať fixné jednoduché napájanie +13 V, čo znamená príjem vertikálne polarizovanej vlny. Tým je určená aj polarizácia vlny šumového žiariča. Šumový žiarič bude musieť pre správny príjem vysielat vertikálne polarizovanú vlnu.

6.2 Synchronný detektor

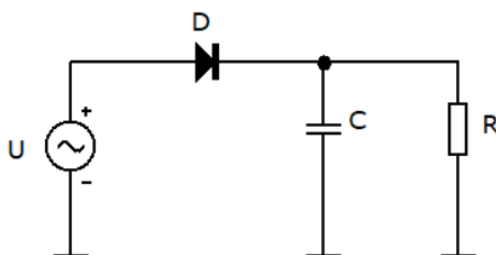
6.2.1 Detektor obálky

Výstupný signál z LNB konvertoru bude po konverzií vo forme pôvodného šumového signálu, ale niekde so strednou frekvenciou v rozsahu 950 až 1750 MHz, zosilnený o hodnotu konverzného zisku. Tento signál je potrebné previesť do formy jednosmerného signálu.

Pre získanie jednosmernej hodnoty zo šumového signálu je možné použiť obáľkový detektor. Najjednoduchší detektor sa skladá z diódy a paralelnej kombinácie kondenzátora a rezistora. Úlohou detektora je detekovať v modulovanom signále modulačný signál. V tomto prípade je možné brať ako modulovaný signál vstupný šumový signál a jeho modulačná zložka je jednosmerná zložka určitej amplitúdy. Pre funkčnú detekciu musí byť zvolená vhodná časová konštanta τ , ktorá je daná vzťahom:

$$\tau = R \cdot C \quad (6.1)$$

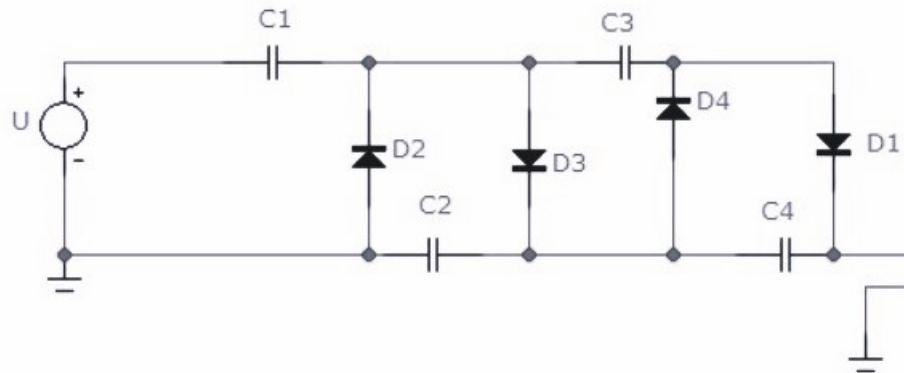
kde R je odpor rezistora a C je kapacita kondenzátora [1]. Časová konštanta udáva, ako rýchlo sa dokáže kondenzátor nabíjať a vybíjať. Pri nízkej hodnote časovej konštanty dosiahne detektor rýchlo maximálnu hodnotu napätia a zároveň aj rýchlo dosahuje minimálnej hodnoty. Približne tak kopíruje modulovaný signál, čo nieje žiadúce. V prípade vysokej hodnoty časovej konštanty sa detektor stáva špičkovým detektorom maximálnej hodnoty, pretože kondenzátor sa nestíha vybíjať.



Obr. 6.2: Diódový detektor

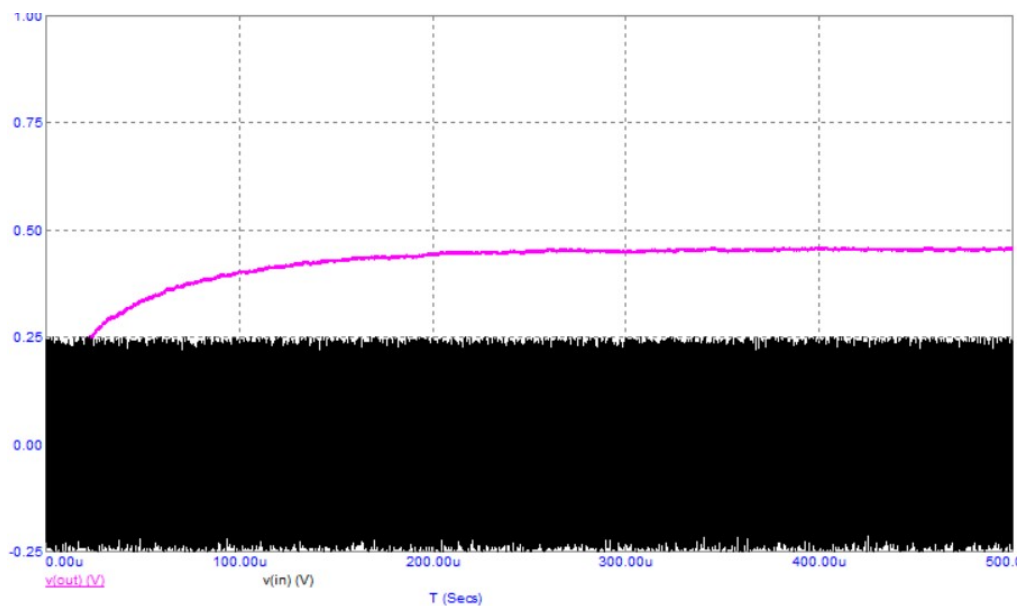
V prípade slabých signálov musí byť dióda typu Schottky, ktorá má nižšie otváracie napätie aby niektoré slabé napätové pulzy nezostali pod úrovňou detekcie, čo by malo za následok skreslenie signálu. Výsledný detekovaný signál má len polovičnú amplitúdu oproti modulovanému signálu. V prípade slabých signálov je obtiažne následné ďalšie spracovanie, napríklad prevod do digitálnej podoby. Pre zväčšenie detekovanej zložky je možné použiť zdvojovač napätia. Zdvojovač plní taktiež úlohu detektora avšak na výstupe zdvojovača sa objaví dvojnásobná hodnota jednosmernej zložky oproti klasickému detektoru. Zdvojenie sa dosiahne pridaním ďalšej diódy

a kondenzátora pred detektor tak, aby výstupné napätie zdvojovača bolo súčtom napätia na kondenzátore $C1$ a prichádzajúcim napätím na vstupe. Pre ďalšie zvyšovanie



Obr. 6.3: Kaskádny násobič napätia, $n=4$

úrovne detekovanej zložky sa dá použiť kaskádny násobič napätia, ktorý znásobí vstupnú hodnotu signálu n -krát, pričom n je počet zapojených článkov tvorených kondenzátorom a diódou.



Obr. 6.4: Výstupné napätie v simulácii na násobiči

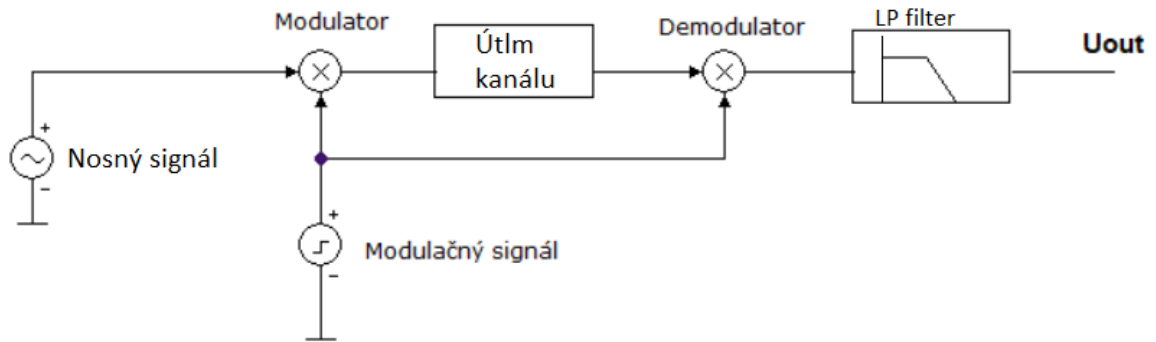
Pri návrhu detektora v mikrovlnnom pásme je potrebné zohľadniť parazitné vlastnosti použitých súčiastok, ako sú parazitné kapacity a indukčnosti puzdier a taktiež parazitné vlastnosti spôsobené doskou plošných spojov. V tomto prípade, namiesto štúdia katalógových listov a kalkulácií, je lepšou možnosťou použiť integrovaný

komerčný detektor. Tieto detektory sú predávané v rôznych frekvenčných rozsahoch, od niekoľkých desiatok MHz do jednotiek až desiatok GHz. Namiesto výberu a umiestnenia jednotlivých komponentov diódového detektora je všetko integrované v jednom SMD puzdre, kde kvalitu a parametre garantuje výrobca v rámci stanovených limitov. Pre tento návrh bude zvolený obvod LTC5531 od firmy Analog technologies. Rozsah vstupnej frekvencie je 300 MHz až 7 GHz. Frekvenčné pásmo detektoru teda v plnom rozsahu pokrýva frekvenčné pásmo medzifrekvenčného signálu z LNB. Obvod je v puzdre TSOT-23 a disponuje 6 pinmi. Okrem vstupu a výstupu disponuje aj pinom pre Shutdown, ktorým je možné prakticky detektor vypnúť s tým, že si zachová len nízky napájací prúd a napätie na výstupe stiahne k 0V. Ďalším špeciálnym pinom je V_{OS} pin, ktorým je možné regulovať výstupné offsetové napätie od 120mV smerom nahor. Zapojenie LTC5531 bude zvolené štandardne, podľa datasheetu [24]. Na vstup bude privedený signál z LNB konvertora. Pin pre Shutdown bude trvalo v logickej jednotke, nakoľko nieje dôvod obvod vypínať. Taktiež pin V_{OS} bude trvalo v logickej nule, pretože nieje potrebné pridávať offset na výstup obvodu.

6.2.2 Demodulátor

Integrovaný detektor má svoj vlastný zisk, ktorým posilňuje výstupnú úroveň jednosmernej zložky. Ani to však nemusí stačiť pre funkčnosť obvodu, pokiaľ na vstup detektoru prichádza dostatočne nízky signál. Napríklad z dôvodu offsetového napätia vstupných pinov niektorých integrovaných obvodov. Podľa katalógového listu obvodu LTC5531 sa pri úrovni vstupného signálu pod -20 dBm na frekvencii 4000 MHz objaví napätie na výstupe niečo menej ako 0,2 V. Pri tomto prípade by mohlo offsetové napätie vstupných pinov iných integrovaných obvodov zakryť prichádzajúci detekovaný signál. To, že prichádzajúci signál z LNB bude pravdepodobne na nízkej úrovni, prispieva uváženie, že už samotný prijímaný signál bude slabý z dôvodu útlmu šírením, útlmu vo vzorke materiálu. Pre dosiahnutie vysokej citlivosti aj na slabé signály bude použitá synchronná detekcia signálu. Princíp synchronnej detekcie spočíva v použití modulácie vysielaného signálu a jeho následnej demodulácie v detektore, pričom modulačný signál je synchronný s demodulačným. Princíp synchronnej detekcie je ukázaný na Obr. 6.5.

Nároky na demodulátor nie sú vysoké. Na jeho vstup bude privádzaný detekovaný signál modulovaný nízkofrekvenčným signálom a na jeho druhý vstup pôjde samotný modulačný signál. Pre tento účel bol opäť vybraný komerčný demodulátor AD630 v SMD puzdre. Tento 20-pinový integrovaný obvod zahŕňa dva vstupné kanály, vstup pre modulačný signál a interné rezistory, ktoré slúžia na nastavenie zisku ± 1 alebo ± 2 . Každý kanál obsahuje invertujúci a neinvetujúci vstup. Jeho zapojenie ako demodulátoru bude prebraté z katalógového listu, zo zapojenia pre Lock-in

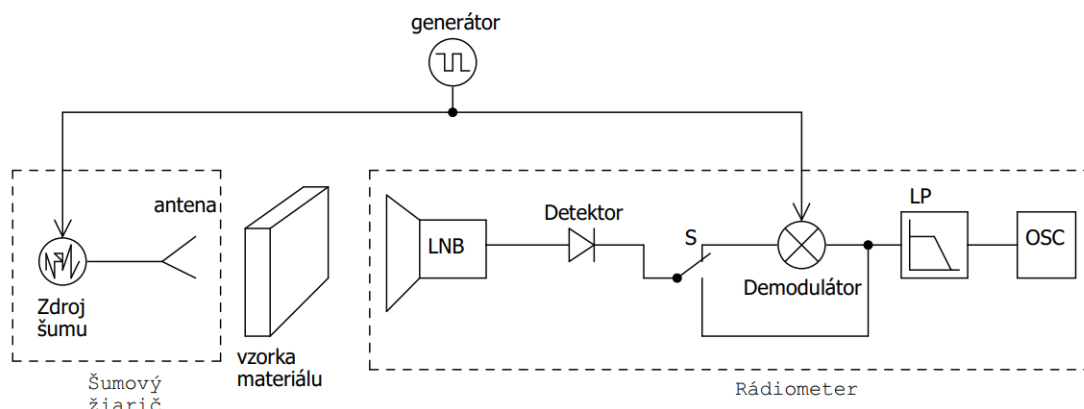


Obr. 6.5: Princíp synchronnej detekcie

zosilňovač [25], kde zisk demodulátoru bude nastavený na ± 2 . Po detekcii medzifrekvenčného signálu bude detekovaný signál kladný a privádzaný na neinvertujúci vstup kanála A. Tým pádom bude aj výstupný signál kladný a zväčšený dvakrát. Na vstup SEL A bude privádzaný obdĺžnikový signál s frekvenciou 500 Hz. Táto hodnota modulačnej frekvencie je zvolená v stovkách Hz, aby mal detektor obálky dostatok času na ustálenie výstupnej hodnoty na log 0 alebo 1. Obdĺžnikový signál bol zvolený pre jeho jednoduché vygenerovanie, čo umožňuje použiť ako generátor modulačného signálu aj jednoduché preklápacie obvody alebo mikroprocesory. Pre správnu činnosť obvodu AD630 je potrebné zabezpečiť symetrické napájanie. To bude v rozmedzí ± 5 V, pretože nie je potrebné dosahovať vyššie hodnoty detekovaného signálu.

6.3 Dolnopriepustný filter

Za demodulátorom je potrebné použiť dolnopriepustný filter, ktorý odstráni nízkofrekvenčnú striedavú modulačnú zložku a na výstupe zostane iba jednosmerná zložka. Do úvahy pripadá aktívny alebo pasívny dolnopriepustný filter. Pasívny filter by demodulovaný signál vyhladil, ale zároveň aj utlmil, čo by spôsobilo stratu citlivosti. Preto bude použitý aktívny filter ktorý dokáže okrem vyhladenia aj zosilniť vstupný signál. Pre tento účel bude použitý operačný zosilňovač TL071, ktorý bude v zapojení neinvertujúceho dolnopriepustného filtra. Návrh hodnôt súčiastok bol riešený s použitím simulácie Microcap 12. Vo finálnom riešení budú rezistory pre zisk a nulovanie výstupného offsetu nahradené odporovými trimrami, z dôvodu finálneho doladenia na vyrobenom zapojení, aby bolo možné vykompenzovať nepresnosti reálnych vlastností súčiastok a plošného spoja. Frekvenčná charakteristika filtra je na Obr. Z charakteristiky je vidieť, že filter má na frekvencii 500 HZ zisk okolo ... Celková bloková schéma je na Obr.6.6



Obr. 6.6: Bloková schéma systému aktívnej šumovej rádiometrie

6.4 Návrh plošného spoja a konštrukcia

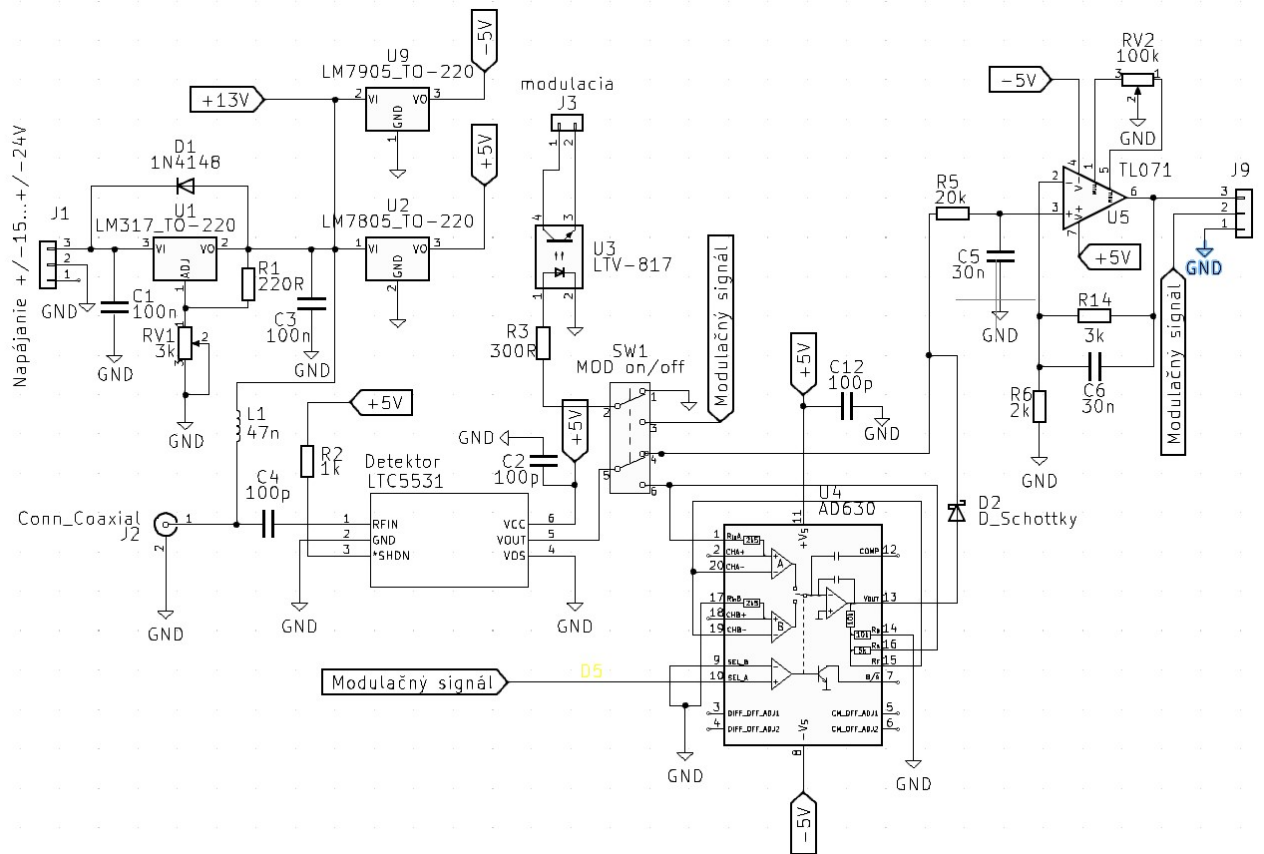
Návrh plošného spoja bude zahŕňať vstupnú vysokofrekvenčnú časť od výstupu LNB ku vstupu detektora a ďalej návrh nízkofrekvenčnej časti synchronného detektora. Vstupná časť zahŕňa vysokofrekvenčný konektor, na ktorý je pripojený koaxiálny kábel z LNB výstupu. Pre pripojenie koaxiálneho káblu do plošného spoja bol vybratý F-konektor pre montáž do plošného spoja. Zo signálneho pinu konektora je potrebné priviesť signál na vstupný pin detektora.

Pretože sa na tomto úseku jedná o mikrovlnný signál, pre spojenie medzi F-konektorom a detektorom bolo navrhnuté koplanárne vedenie s charakteristickou impedanciou 75Ω , podľa charakteristickej impedancie koaxiálneho vedenia. Pri návrhu mikrovlnných obvodov je bežná prax riešenie prispôsobenia vedenia ku vstupnej impedancii záťaže, v tomto prípade detektora. Vstupná impedancia detektora je podľa datasheetu ($86,3 - j136,18 \Omega$) pre medzifrekvenciu $1,3 \text{ GHz}$. Táto medzifrekvencia prislúcha vstupnej frekvencii rádiometra $3,75 \text{ GHz}$. Táto vstupná frekvencia je zvolená ako základná frekvencia pre šumový žiarič a bude diskutovaná v kapitole návrhu šumového žiariča. Z hodnoty vstupnej impedancie je vidieť, že reálna zložka je len o 11Ω väčšia ako charakteristická impedancia vedenia. Reaktančná zložka nieje taktiež veľmi veľká. Prispôbenie vedenia k detektoru preto nieje špeciálne riešené, nakoľko ide o experimentálne zariadenie a jeho funkčnosť bola overená experimentami popísanými v ďalších kapitolách. Signál z LNB sa privedie na vstup detektora cez oddeľovací kondenzátor, ktorý ma za cieľ odfiltrovať prípadnú jednosmernú zložku z LNB. V tejto aplikácii je akýkoľvek offset veľmi nežiadúci, pretože skresľuje skutočnú nameranú hodnotu signálu na výstupe rádiometra. Detektor spolu s demodulátorom budú v SMD puzdrách osadené na spodnú stranu plošného spoja. Plošný spoj bude navrhnutý ako jednovrstvový, z dôvodu jednoduchého ručného osádzania. Na

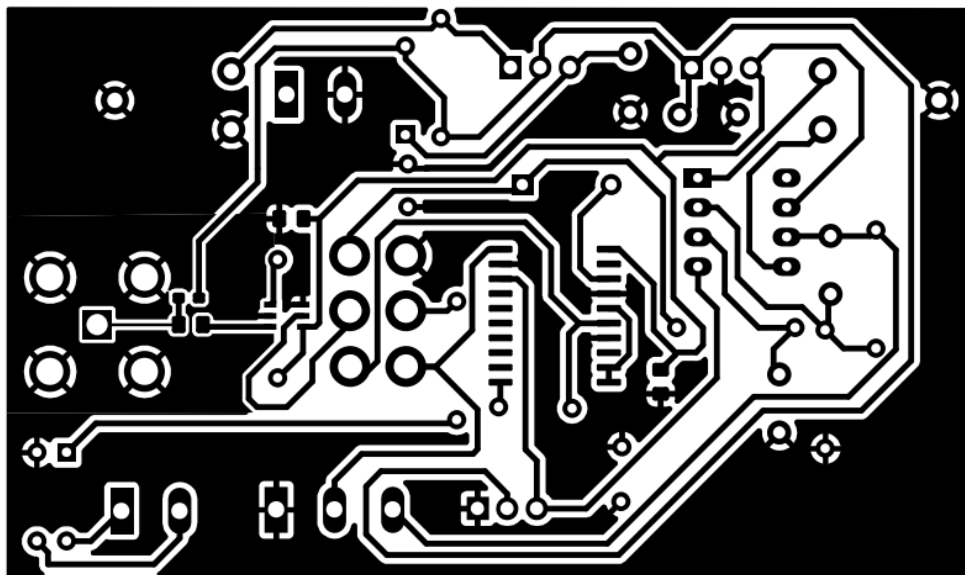
vrchnej strane budú osadené THT súčiastky, ktoré nemusia byť nutne v SMD puzdre. Pre experimentálne účely bude do zapojenia budú zahrnutý aj prepínač so 6 pólmí v režime ON-ON, ktorého účelom bude prepínať rádiometer medzi stavmi s moduláciou a bez modulácie. Tak bude možné porovnať účinnosť rádiometra bez a s použitím modulácie. Na vstup nízkofrekvenčného filtra teda pôjde buď priamo signál z detektoru, alebo demodulovaný signál z AD630.

Na plošnom spoji sa bude nachádzať SMD tlmivka, ktorá bude slúžiť ako odbočka pre napájanie LNB konvertoru. Toto riešenie zabraňuje unikaniu medzifrekvenčného signálu do napájacích obvodov. Tlmivka bude vybratá na základe vlastnej rezonančnej frekvencie, ktorá musí byť ideálne rovnaká ako stredná frekvencia medzifrekvenčného signálu. Nakoľko má medzifrekvenčný signál šírku pásma 1 GHz s hornou medzou 1750 MHz, bola vybratá tlmivka LQW18AS47NG00D s indukčnosťou 47nH s rezonančnou frekvenciou na 2 GHz [26]. Tento výber zaisťuje, že v celom rozsahu medzifrekvenčného signálu bude mať tlmivka induktívny charakter a jej impedancia bude rásť s rastúcou frekvenciou.

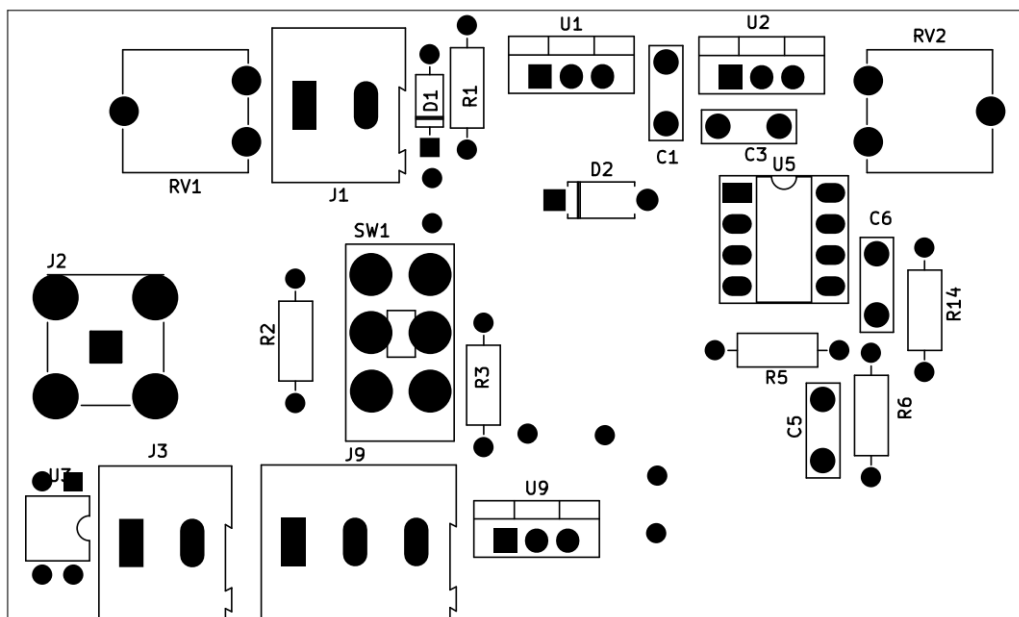
Napájanie pre integrované obvody bude zabezpečovať regulovateľný stabilizátor napätia LM317 v TO220 puzdre. Z neho budú napájané napäťové stabilizátory LM7805 a LM7905. Tieto stabilizátory budú slúžiť na napájanie integrovaných obvodov LTC5531, AD630 a TL071. Pre posledné dva menované je potrebné priviesť symetrické napájanie. Preto je do obvodu zapojený aj negatívny napäťový stabilizátor. Rádiometer bude preto vyžadovať symetrický zdroj s rozsahom minimálne +14V a -5V. Do plošného spoja rádiometra bude privádzaný demodulačný signál z externého generátora pre účely synchronnej detekcie. Tento signál bude distribuovaný cez optočlen do šumového žiariča, čím by sa malo zamedziť prenikaniu rušivého modulačného signálu pri spínaní šumového prvku zo šumového žiariča naspäť do rádiometra. Celková schéma zapojenia je na Obr.6.7 a návrh plošného spoja je na Obr.6.8. Osadzovací výkres pre stranu TOP plošného spoja je na Obr.6.9. Pozície osadenia SMD súčiastok na spodnej strane BOTTOM je vidieť na obrázku Obr.6.8. Celková konštrukcia rádiometra je na Obr.6.10. Je na nej vidieť LNB konvertor, ktorý je jednoducho prichytený na kus extrudovaného polystyrénu a spolu s ním je k nemu pripevnená doska plošného spoja rádiometra. Extrudovaný polystyrén slúži ako podstava pre uchytenie a fixovanie pozície LNB konvertora tak, aby jeho vertikálna os bola kolmá na rovinu zeme. Výber extrudovaného polystyrénu pre tento účel bol z dôvodu jeho nízkej hmotnosti a ako bude vidieť v kapitole Experimentálne overenie systému, tento materiál vykazuje veľkú priepustnosť. Znamená to, že na vyžiarený signál pôsobí tak, ako keby bola na jeho mieste iba vzduchová medzera takže neovplyvní výsledky meraní.



Obr. 6.7: Celková schéma zapojenia rádiometra



Obr. 6.8: Návrh plošného spoja rádiometra- TOP



Obr. 6.9: Osadzovací výkres rádiometra - strana TOP



Obr. 6.10: Konštrukcia rádiometra

7 Návrh šumového mikrovlnného žiariča

7.1 Výber zdroja šumu

Od šumového žiariča bude vyžadovaný dostatočný vyžiarený výkon z dôvodu rôznych útlmov. Ako prvé je preto potrebné vybrať dostatočne silný zdroj šumového signálu. Základom bude súčiastka s polovodičovým PN prechodom. Tento výber je dôsledkom jednoduchosti regulácie šumového signálu prostredníctvom prúdu cez PN prechod. Pôjde teda o produkciu výstrelového šumu.

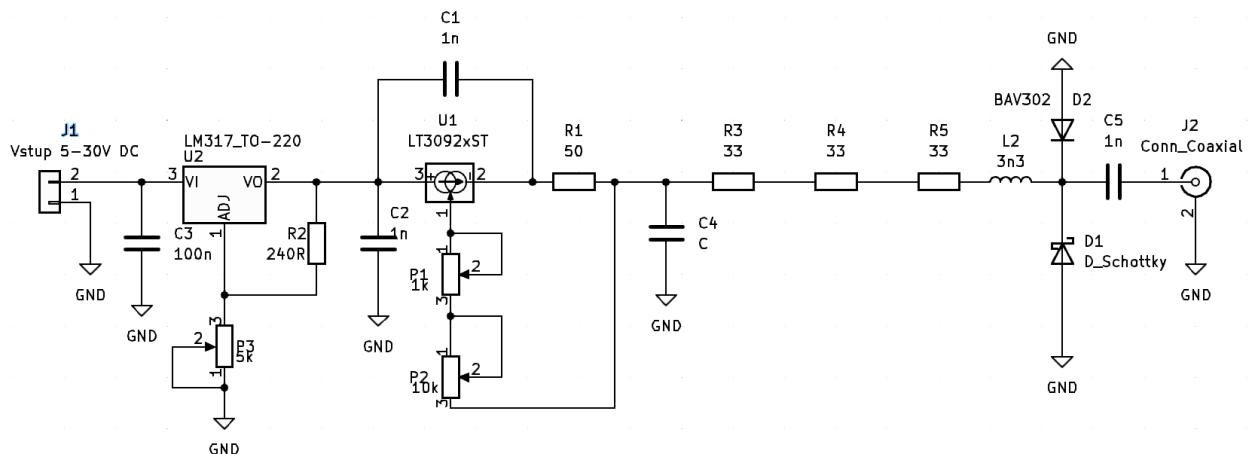
Ako bolo spomenuté v kapitole o zvyšovaní citlivosti rádiometra, vyšší šumový výkon je možné dosiahnuť pomocou súčiastok s vyšším ENR. Použitie šumových diód by bolo ideálne pre tento účel, avšak vysoká cena a horšia dostupnosť týchto diód má za následok výber dostupnejších súčiastok, ako sú zenerové diódy a B-E prechody tranzistorov. Pre výber čo najvýkonnejších šumových súčiastok je nutné posúdiť ich ENR. Tento parameter nebýva obvykle uvádzaný v katalógových listoch, nakoľko nieje primárnym parametrom polovodičových súčiastok. Ďalšom možnosťou je výpočet, podľa vzorca (1.7). Pre tento výpočet je potrebné vedieť šumovú teplotu súčiastky. Tento parameter taktiež nieje jednoduché zistiť. Preto je najlepším spôsobom experimentálne overenie. Pre tento účel musí byť skonštruovaný prístroj, ktorý by dokázal dodávať prúd do meranej súčiastky, pre vznik výstrelového šumu a následne generovaný šum zo súčiastky poslať na výstupný konektor pre meranie úrovne ENR.

7.1.1 Návrh ENR testera

Koncept ENR testera bude pozostávať zo zdroja prúdu, nakoľko polovodičový P-N prechod je potrebné napájať najlepšie zdrojom konštantného prúdu. Následne musí obsahovať vysokofrekvenčnú časť, ktorá bude schopná odvádzať šum v mikrovlnnom pásme na výstup ENR testera. Pre návrh bude použitý koncept šumového zdroja s maximálnou frekvenciou 10 GHz.

Prvá časť testera tvorí obvod regulovateľného stabilizátora napätia, založeného na integrovanom obvode LM317. Stabilizátor napätia má dynamický rozsah na vstupe 2,4 V až 30 V jednosmerného napätia. Za napäťovým stabilizátorom nasleduje zdroj regulovateľného konštantného prúdu, ktorým je obvod LT3092. Tento obvod má rozsah konštantného prúdu od 0,5 mA do 200 mA. Pre reguláciu prúdu sa používajú dva rezistívne trimre, $P1$ pre jemnú reguláciu a $P2$ pre hrubú reguláciu prúdu. Oba regulátory majú pripojené na vstupoch a výstupoch filtračné kondenzátory pre zabránenie nežiadúcich oscilácií a napäťových špičiek pri zmenách záťaže. Po kondenzátore $C4$ nasleduje vysokofrekvenčná časť obvodu. Táto časť má základ v [27]. Tvoria ju 3 rezistory s hodnotou 33Ω , ktoré obmedzujú prúd do testovného

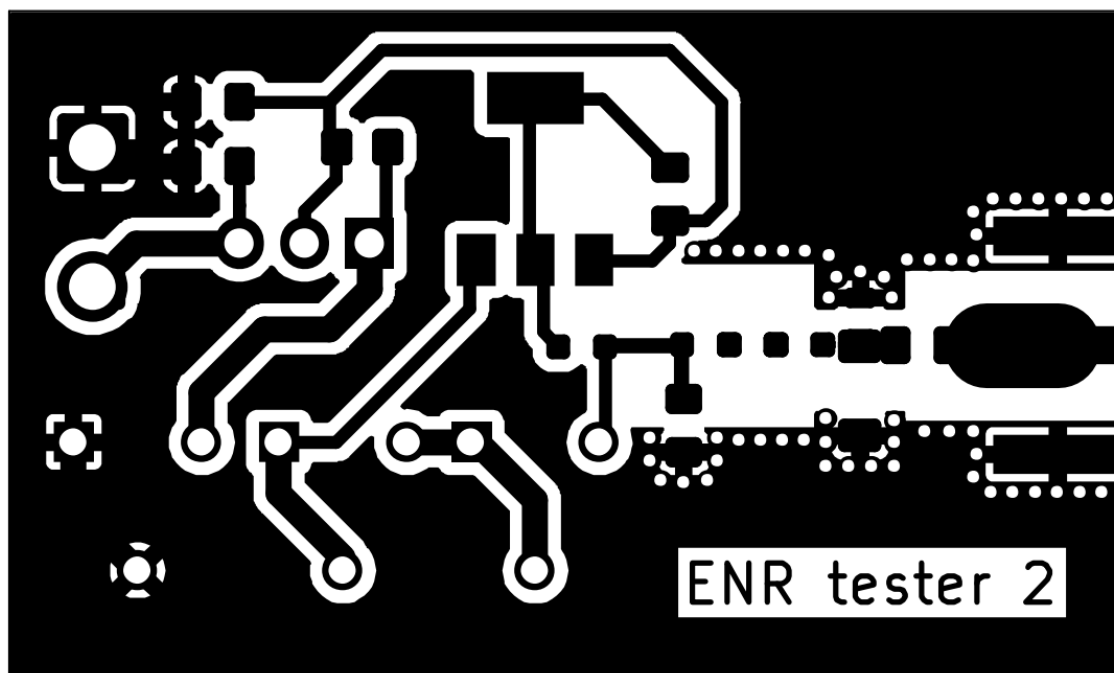
PN prechodu. Kombinácia troch sériovo zapojených rezistorov je zvolená z dôvodu obmedzenia vzniku tepelného šumu pri použití a následnom zahriatí iba jedného rezistoru. Rezistory sú v puzdre 0603 z dôvodu čo najväčšej eliminácie parazitných kapacít. Z tohoto dôvodu sú ich umiestnenie na plošnom spoji tesne vedľa seba. Za rezistormi nasleduje vysokofrekvenčná tlmivka v SMD prevedení, ktorá má za cieľ zamedziť mikrovlnnému šumu prenikať do napájacej časti obvodu a tým predísť nežiadúcej strate mikrovlnného šumu na výstupe testera. Tlmivku je nutné vybrať podľa jej vlastnej rezonančnej frekvencie. Pre túto aplikáciu je uvažovaná frekvencia do 12 GHz. Preto je zvolená vysokofrekvenčná tlmivka s rezonančnou frekvenciou 12 GHz, čo prakticky znamená, že do tejto frekvencie impedancie cievky rastie a dosahuje svoje maximum práve na tejto frekvencii. Následne sú na plošnom spoji umiestnené pady pre osadenie SMD šumovej súčiastky. Použité sú dva rozstupy puzdier, pre väčšie aj menšie súčiastky. Pri väčšom puzdre je uvažované aj osadenie THT súčiastok, ktoré budú mať skrátene vývody na minimálnu možnú dĺžku, aby bolo možné súčiastku osadiť a tiež znížiť parazitné indukčnosti vývodov súčiastky. Šumová súčiastka je napájaná jednosmerným prúdom, pričom sa v jej PN prechode generuje širokospektrálny šum. Tento šum je odvádzaný na výstup cez SMD kondenzátor *C5*, ktorý oddeľuje vysokofrekvenčný výstupný SMA konektor od zvyšku obvodu a zároveň odstraňuje jednosmernú zložku pochádzajúcu z napájania. Schéma zapojenia ENR tester je na Obr.7.1. Návrh plošného spoja a osadzovací výkres sú na Obr.7.2 a Obr.7.3. Celková fotografia ENR testera je na Obr.7.4.



Obr. 7.1: Schéma zapojenia ENR testera

7.1.2 Meranie ENR

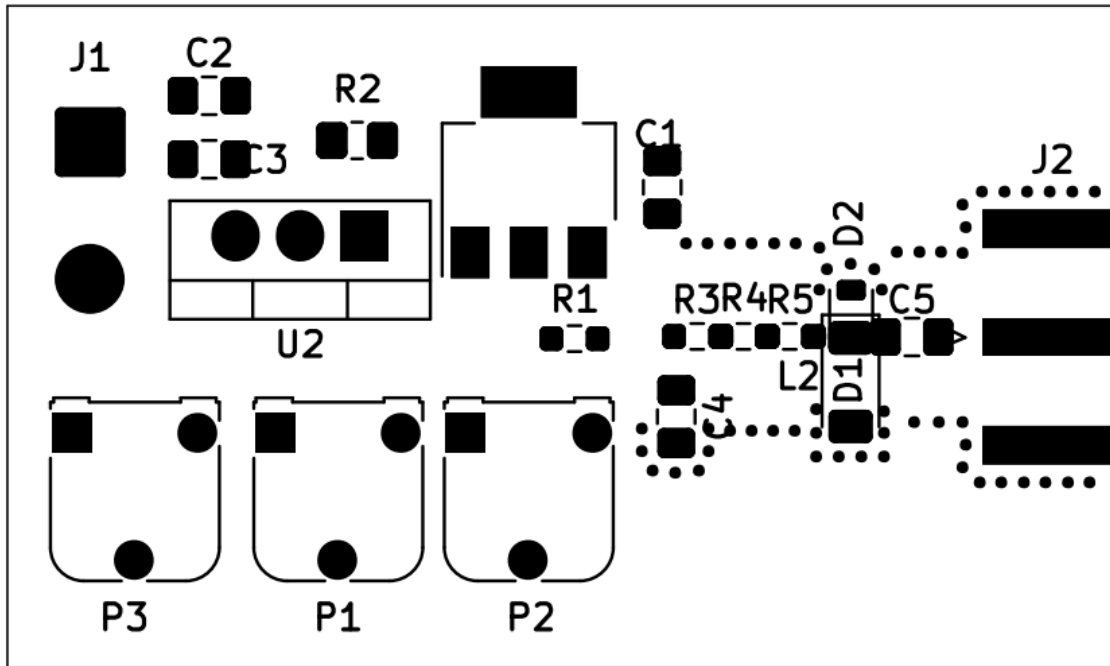
Pre meranie ENR boli zvolené náhodné polovodičové ľahko dostupné súčiastky. Na výstupe SMA konektoru bol pripojený spektrálny analyzátor tinySA ULTRA,



Obr. 7.2: Doska plošného spoja ENR testera

ktorým bola meraná úroveň výkonu šumu na výstupe testera, naprieč merateľným spektrom pomocou zvoleného analyzátoru. Pri meraní bolo potrebné meniť prierazné napätie PN prechodov jednotlivých súčiastok. PN polovodičový prechod tranzistora, ktorý je polarizovaný v závernom smere má obvykle prierazné napätie okolo 5V. Zenerové diódy, ktoré sú stavané na vyššie napätie, sa otvorila až pri požadovanom Zenerovom napätí. Pre zistenie maximálneho ENR, ktoré je závislé na prúde, bolo potrebné nastavovať aj prúd prechodom. Taktiež bolo potrebné rešpektovať maximálnu povolenú výkonovú stratu súčiastky. Pri prieraznom napätí začal do prechodu tiecť prúd, avšak maximálne taký, ktorý bol nastavený na prúdovom zdroji.

Z meraní vyplýva, že úroveň šumu rastie spolu s pretekajúcim prúdom, avšak od určitej hodnoty prúdu sa už ENR spolu s prúdom nezvyšuje. Práve naopak, nastane opačný efekt a ENR začne klesať. Ako ENR bola použitá hladina šumu na frekvenčnom pásme od 3,5 GHz do 4 GHz. Hodnota hladiny šumu bola následne porovnávaná s hladinou šumu analyzátoru bez meranej súčiastky. Najvyššie hodnoty ENR dosahovali súčiastky, ktoré mali vyššie prierazné napätie prechodu pri rovnakom prúde, v porovnaní s ostatnými testovanými súčiastkami. Tento jav by sa mohol dať pripísať výkonu, ktorý bol privedený na PN prechod. Z tohto dôvodu bola zaznamenaná najvyššia hodnota ENR na Zenerovej dióde so zenerovým napätím 18V. Je možné predpokladať, že so zvyšujúcim sa zenerovým napätím by rástol aj ENR parameter.

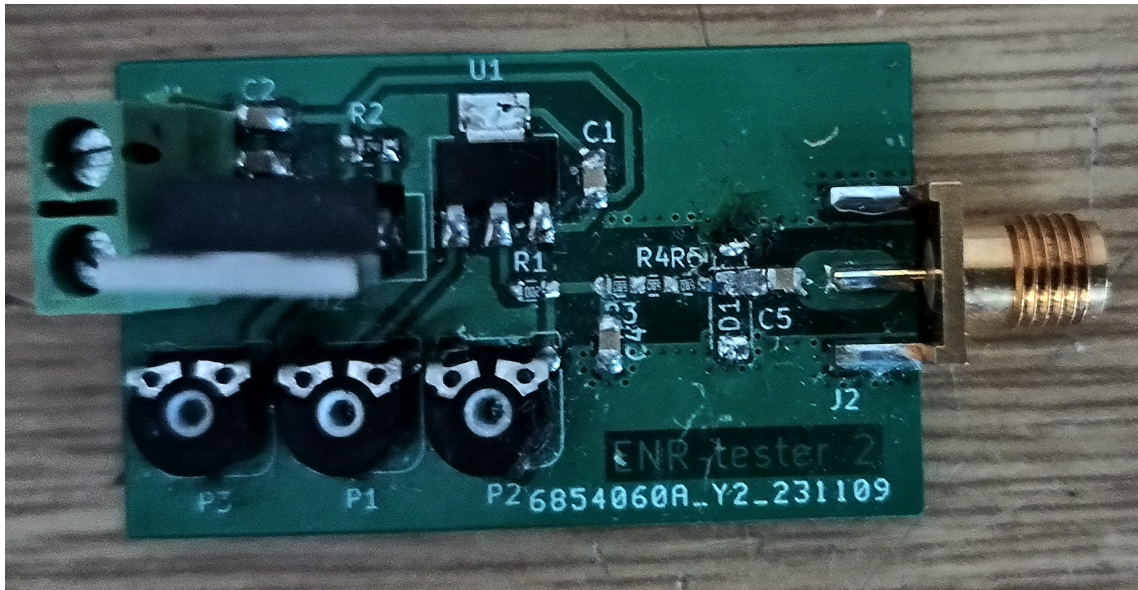


Obr. 7.3: Osadzovací výkres ENR testera

7.2 Anténa žiariča

Anténa žiariča by mala byť ideálne čo najviac smerová, aby nevznikala zbytočná strata signálu do okolia, ale čo najviac energie smerovalo do skúmanej oblasti. Existuje viacero typov smerových antén, ako napríklad parabola, ktorá sa používa priamo v kombinácii s LNB konvertorom, alebo lieviová anténa, ktorú je súčasťou LNB. Je potrebné vybrať anténu, ktorá môže vybudíť vertikálne polarizovanú vlnu, ideálne s veľkou šírkou pásma, pretože výkon šumu závisí na šírke pásma šumu podľa vzťahu (1.1). Ako anténa bude na začiatku zvolený polvlnný dipól, nakoľko to je prakticky najjednoduchšie realizovateľná varianta antény. Dipól sám o sebe nie je širokopásmový ani smerový avšak určitými jeho úpravami je možné dosiahnuť zlepšenie týchto vlastností. Pre zistenie dĺžky dipólu je stanovená frekvencia 3,75 GHz. Táto hodnota leží približne v strede frekvenčného pásma LNB konvertora, takže bude možné využiť prakticky celú jeho šírku pásma. Je taktiež zvolená z praktického dôvodu dobrej počítateľnosti násobkov vlnovej.

Základný prvok antény je zvolená Zenerová dióda na základe výsledkov z merania ENR šumových zdrojov, ktorá bude slúžiť ako zdroj šumu pre anténu. Aby sa zo zdroja šumu stal šumový žiarič, je potrebné pripojiť na výstup zdroja šumu anténu. Následne je potrebné riešiť prispôsobenie impedancie antény k vedeniu. Jednoduchší spôsob vytvorenia dipólovej antény z diódy je podľa [10] pripojiť priamo na vývody katódy a anódy napájacie vedenie dipólu. Vlnová dĺžka, s ktorou bude



Obr. 7.4: Fotografia ENR testera

žiarič pracovať, je podľa zvolenej frekvencie:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3,75 \cdot 10^9} = 8,1 \text{ cm}, \quad (7.1)$$

Na základe tohoto výpočtu bude zvolená približná dĺžka polvlnného dipólu: $l_d = \lambda/2 = 4,05$ cm, čo je približne 4 cm. Rameno dipólu bude merať potom $l_d/2 = 2$ cm. Konštrukciou dipólu priamo z vývodov Zenerovej diódy je eliminovaná potreba prispôsobenia antény k vedeniu, avšak stále je potrebné vyriešiť únik šumového signálu cez napájacie jednosmerné vedenie. To je možné vyriešiť pridaním paralelného kondenzátora do napájacieho vedenia diódy vo vzdialenosti $\lambda/4 = 2$ cm. Kondenzátor predstavuje pre vysokofrekvenčný obvod skrat, ktorý vo vzdialenosti $\lambda/4$ pôsobí pre zdroj signálu v ideálnom prípade ako nekonečná impedancia. Po umiestnení kondenzátora do vedenia je potom pre vysokofrekvenčný signál z diódy napájacie vedenie akoby ukončené na prázdno a neuniká ním šumový signál, ktorý je inak potrebné vyžiarit. Použitý kondenzátor bude v SMD prevedení s kapacitou do 1 nF.

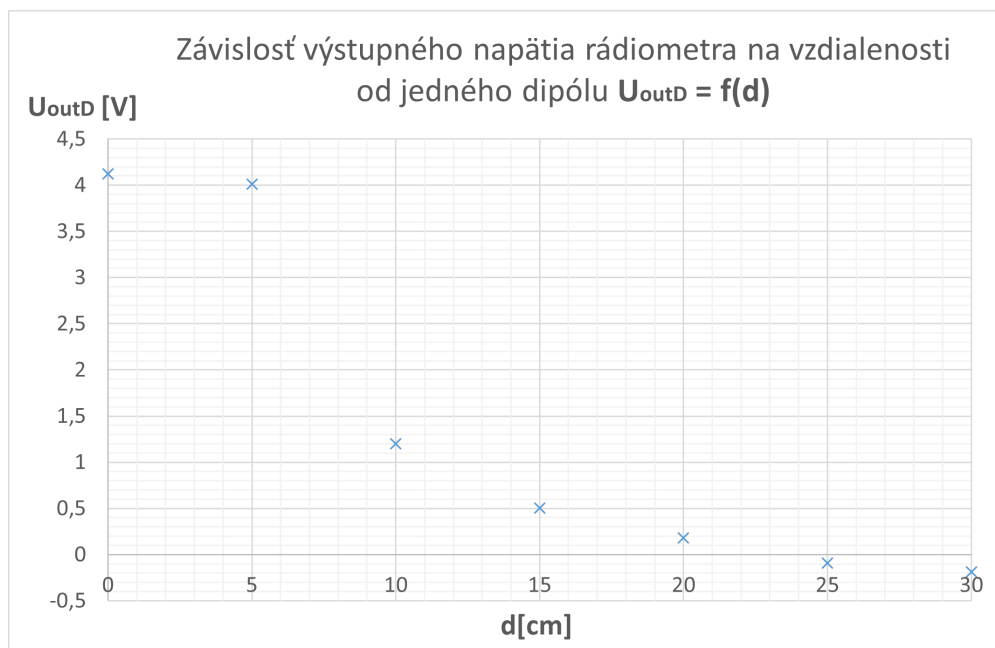
7.2.1 Overenie šumového žiarenia jedného dipólu

Aby sa mohol merací systém použiť na meranie vlastností materiálov z väčšej vzdialenosti, resp. na vzorky materiálov s väčším útlmom, je potrebný dostatočne veľký výkon šumového žiariča. Pre zvýšenie výkonu sa ako prvá možnosť naskytne použitie vysokofrekvenčného zosilňovača, ktorý by generovaný šum so zenerovej diódy zosilnil a následne ním napájal anténu. Táto varianta je však náročná, z hľadiska návrhu, nakoľko vysokofrekvenčný zosilňovač musí byť kvalitne zhotovený pre pásmo 3,4

GHz až 4,2 GHz. Taktiež by bolo potrebné riešiť prispôsobenie antény k zosilňovaču a ku dióde. Jednoduchšie riešenie sa ponúka z experimentov Dr. Polívky, ktorý skúšal spojiť viacero šumových žiaričov do anténneho poľa. Ukázalo sa, že plošné pospájanie deviatich šumových žiaričov do matice 3x3 prinieslo zvýšenie prijímaného výkonu rádiometrom vo vzdialenosti 40cm viac ako 5-násobne [21]. Zdroje šumu tvorili P-N prechody diód, ktoré boli napájané z jedného zdroja a na vývody diód boli pripevnené ramená dipólov s dĺžkou $\lambda/2$. Pospájanie viacerých žiaričov nemalo vplyv na tvar vyžarovacieho diagramu, ktorý sa len zväčšil v prednom smere antény. Pre ďalšie zvýšenie výkonu bude umiestnený reflektor za anténne pole. Reflektor bude pokrývať celú plochu anténneho poľa, aby mohlo byť čo najviac vyžiareného výkonu odrazeného do oblasti objektu.

Aby bolo možné porovnať vlastnosti anténneho poľa, a zároveň otestovať reálne vlastnosti navrhnutého rádiometra, boli vykonané počiatočne experimenty s jedným a dvoma dipólmi, aby sa overil vplyv radenia jednotlivých šumových žiaričov do anténneho poľa. Ako prvý experiment bol najskôr testovaný samostatný dipól. Následne boli odskúšané kombinácie dvoch dipólov umiestnených vertikálne alebo horizontálne vedľa seba. Bola sledovaná výstupná úroveň napätia rádiometra bez modulácie, teda signál ktorý je privádzaný z detektora priamo na výstupný filter. Napätie na výstupe rádiometra bez modulácie bude ďalej značené ako U_{outD} . Pri konfigurácii s moduláciou bude výstupné napätie rádiometra značené ako U_{outM} , teda na výstupný filter je privádzaný signál z demodulátora. Dipóly boli počas experimentov umiestnené na polystyrénovú platňu, pre zafixovanie ich vzájomnej vzdialenosti medzi sebou. Pri experimentoch boli dipóly umiestnené 15 cm od rádiometra z dôvodu umiestnenia antén vo vzdialenej oblasti poľa. Vzdialenosť od rádiometra bude ďalej označovaná v texte ako d .

Na Obr.7.5 je vidieť, že s narastajúcou vzdialenosťou d napätie rádiometra klesá, čo je spôsobené stratami šírením. Ďalej je vidieť, že rádiometer ide pri dostatočne nízkej úrovni signálu do záporných hodnôt výstupného napätia. Tento jav je spôsobený záporným výstupným napätím demodulátora. Záporné napätie je následne filtrované aktívnym filtrom. Táto nedokonalosť však nemá vplyv na výsledky experimentov. Graf sa skladá zo série nespojených bodov, ktoré reprezentujú namerané hodnoty. Týmto spôsobom je vyjadrená prítomnosť určitej chyby merania ktorou bolo meranie zaťažené a teda nieje možné pospájať body grafu v súvislú krivku, nakoľko existuje predpoklad že ďalším meraním by mohli byť namerané hodnoty mierne odlišné. Týmto spôsobom budú prezentované aj ostatné merané hodnoty v grafoch.



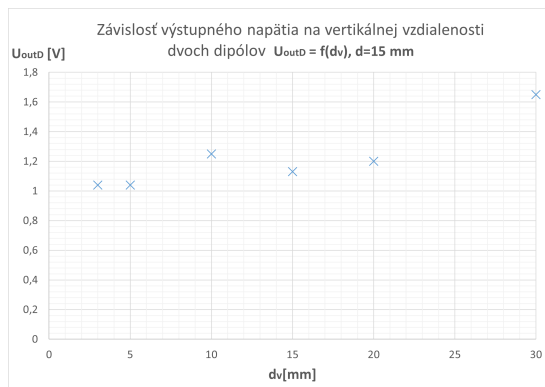
Obr. 7.5: Výstupné napätie U_{outD} pre jeden dipól v závislosti na vzdialenosti

7.2.2 Overenie šumového žiarenia dvoch dipólov

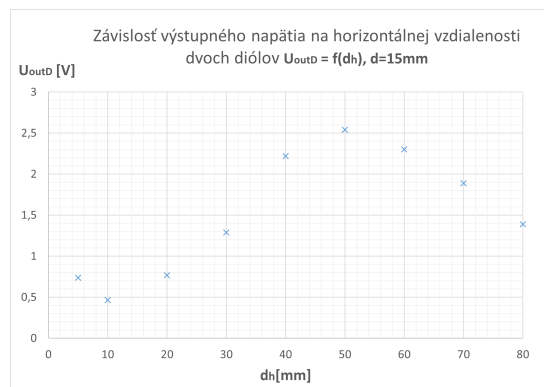
Ďalšími meraniami boli overované účinky dvoch dipólov budených šumovým signálom. Na Obr.7.6b je zobrazené meranie rádiometra pri dvoch dipóloch s meniacou sa horizontálnou vzdialenosťou. Je viditeľné, že pri zväčšovaní horizontálnej vzdialenosti d_h medzi dipólmi výstupná úroveň rádiometra rastie do približne 5 cm. Pri ďalšom zväčšovaní vzájomnej vzdialenosti klesá.

V prípade vertikálne sa vzdalujúcich dipólov na Obr.7.6a je taktiež možné vidieť nárast výstupného napätia rádiometra so zväčšujúcou sa vzdialenosťou d_v . Táto vzdialenosť nebola premeraná až do 80 mm ako tomu bolo pri vzdialenosti d_h . Dôvodom bola výška fázového stredu rádiometra od zeme, ktorá je 9 cm. Pri vzdialenosti $d_v = 8\text{ cm}$ by bol spodný dipól prakticky opretý o zem, čo by do značnej miery ovplyvňovalo jeho vyžarovaciu charakteristiku. Taktiež, zväčšovaním vertikálnej vzdialenosti sa spodný dipól približuje bližšie k zemi, od ktorej sa môžu odrážať elektromagnetické vlny smerom k rádiometru. S každým ďalším priblížením by rástla nepresnosť merania spôsobená skreslením, ktoré je pri horizontálnom posuve stále rovnaké.

Pri ďalších dvoch experimentoch sa overovala výstupná úroveň rádiometra závislá od jeho vzdialenosti d od dipólov, pri dvoch rôznych horizontálnych vzdialenostiach. Experimenty mali za cieľ ukázať vplyv viacerých dipólov na výstup rádiometra. Výsledky sú na Obr.7.7. Tie na Obr.7.7b potvrdzujú správnosť predošlých meraní, nakoľko pri dipóloch vzdialených 40 mm od seba je vyššia výstupná úroveň rádiometra v celom rozsahu merania. Závislosť úrovne U_{outD} pri $d_v = 10\text{ mm}$ je veľmi podobná

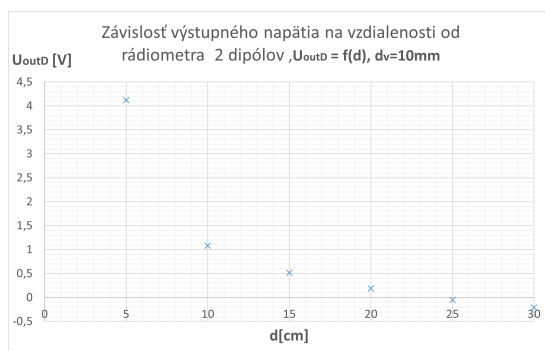


(a) Závislosť U_{outD} na vertikálnej vzájomnej vzdialenosti dvoch dipólov

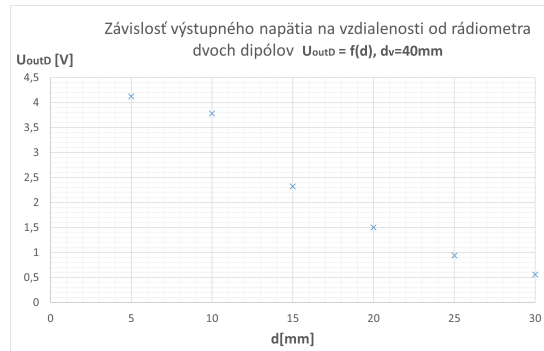


(b) Závislosť U_{outD} na horizontálnej vzájomnej vzdialenosti dvoch dipólov

Obr. 7.6: Zistovanie vplyvu vzájomnej vzdialenosti dipólov na U_{outD}



(a) Funkcia napätia na vzdialenosti pri vertikálnej vzdialenosti 10 mm

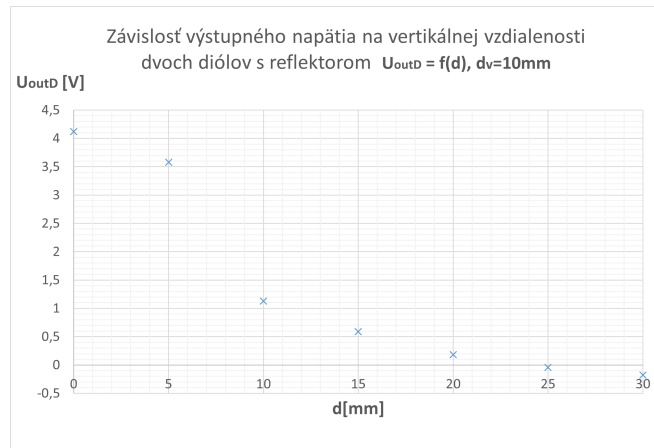


(b) Funkcia napätia na vzdialenosti pri vertikálnej vzdialenosti 40 mm

Obr. 7.7: Porovnanie U_{outD} pri rôznej vertikálnej vzdialenosti dvoch dipólov

tej pre jeden dipól, teda žiaden pridaný zisk. To potvrdzuje aj porovnanie výsledkov s grafom na Obr.7.6b, kde je možné vidieť, že pri horizontálnej vzdialenosti 10mm medzi dipólmi je výstupná úroveň okolo 0,5 V na vzdialenosť 15 cm od rádiometra. Posledným pokusom tohoto typu bolo overenie vlastností šumových dipólov spolu s reflektorom. Reflektor tvorila doska plošného spoja s hrúbkou medi $35 \mu m$ a rozmermi 20 x 10 cm, teda toľko aby presahovala celú plochu dipólov. Reflektor bol vzdialený približne 8mm, hneď za polystyrénovou doskou. Na Obr.7.8 je vidieť veľmi podobná charakteristika akú mali dva dipóly v rovnakej konfigurácii, ale bez reflektora.

Po vyhodnotení výsledkov z meraní vyššie sa dá povedať, že horizontálny rozstup medzi dvoma dipólmi by mal byť ideálne 5 cm. V prípade vertikálnej vzdialenosti by to mali byť aspoň 3 cm, s ohľadom na vzdialenosť od zeme. Pri ambícií použiť

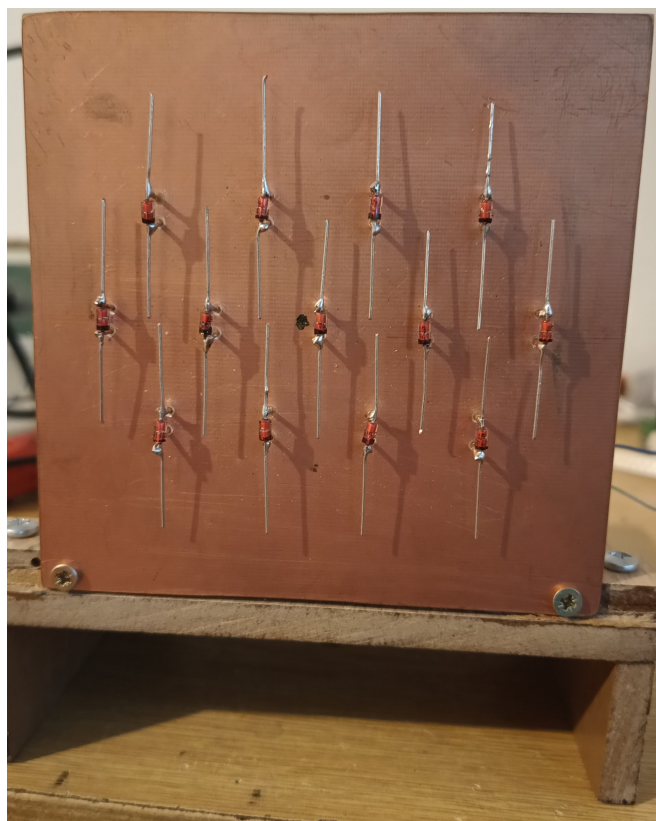


Obr. 7.8: Funkcia napätia na vzdialenosti pri vertikálnej vzdialenosti 10cm s reflektorom

do šumového žiariča aspoň 10 dipólov použití, s týmito rozostupmi však narastá celkový rozmer žiariča. Preto bol skonštruovaný žiarič s 13 dipólmi, s horizontálnymi rozostupmi po 1 cm a 5 mm s vertikálnymi rozostupmi. Myšlienka konštrukcie tohoto žiariča bola umiestniť čo najviac dipólov na malú plochu. Celková plocha žiariča bola tak 8 cm x 8 cm. Pre posilnenie zisku bol pridaný aj reflektor vo vzdialenosti 5 mm za dipólmi. Výsledný šumový žiarič je na Obr.7.9.

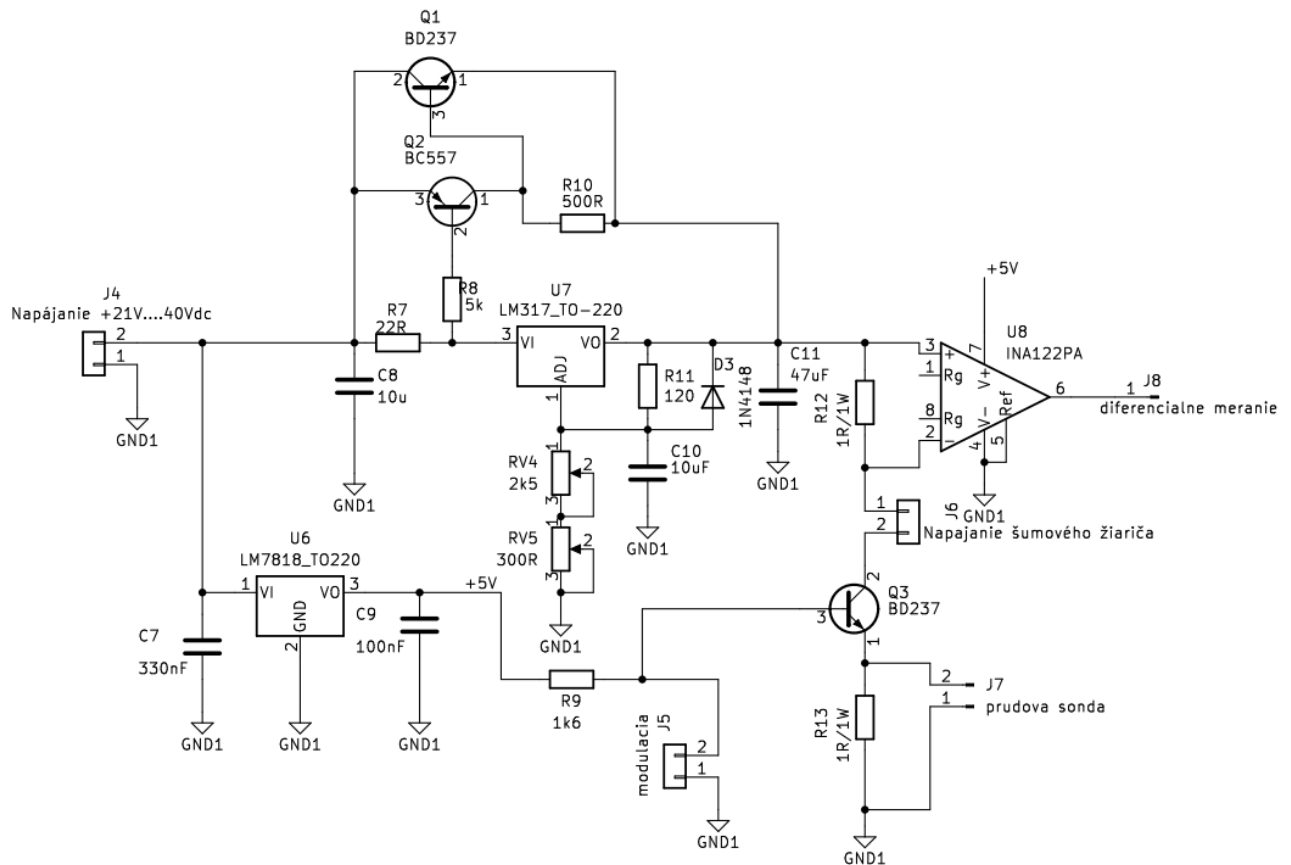
7.3 Napájanie šumového žiariča

Napájanie šumového žiariča a regulácia prúdu sa deje pomocou regulovateľného stabilizátoru LM317. Tento obvod má zapojené dva rezistívne trimre na svoj regulačný obvod, jedne pre jemnú a druhý pre hrubú reguláciu. Jemná regulácia je pridaná z dôvodu jemného nastavenie prúdu, nakoľko sa prúd žiaričom nastavuje pomocou napätia. Regulátor je posilnený o výkonový tranzistor BD237 s označením Q1. Posilnenie je z dôvodu veľkej výkonovej straty, ktorá by bola na regulátore, nakoľko do šumového žiariča tečie prúd okolo 450 mA. Tento prúd je vypočítaný tak, aby do každej Zenerovej diódy mohol tiecť prúd okolo 35 mA. Pre správnu funkčnosť žiariča je potrebné- vstupné napätie zdroja aspoň 21 V. Toto vyššie napätie je z dôvodu použitia 18 V Zenerových diód. K tomuto napätie treba pripočítať úbytok napätia na stabilizátore približne 1,5 V a taktiež vznikajúce úbytky napätia na meracích rezistoroch R12 a R13, okolo 450 mV. Tranzistor Q3 je spínací tranzistor, ktorý zaisťuje moduláciu budiaceho prúdu šumového žiariča. Modulácia prebieha prerušovaním prúdu do bázy pomocou tranzistora v optočlene na doske plošného spoja rádiometra. Modulačný signál je vedený vodičmi z optočlena do svorky J5.



Obr. 7.9: Fotografia finálneho šumového žiariča

Keď je tranzistor v optočlene otvorený, všetok prúd tečúci zo stabilizátora LM718 cez rezistor R9 je zvedený do zeme. V tom momente do tranzistora Q3 netečie bázový prúd a je prechod kolektor-emitor je uzatvorený. Ak je fototranzistor v optočlene uzatvorený, všetok prúd do stabilizátora je tlačný do bázy a tranzistor Q3 je otvorený. V ceste budiacemu prúdu stoja dva rezistory R12 a R13, ktoré sú zaradené do obvodu z dôvodu merania prúdu žiaričom. Na rezistor R12 je pripojený inštrumentálny zosilňovač INA122, ktorý meria napätie na danom rezistore a prevádza plávajúce napätie na napätie voči potenciálu GND1. Tento zosilňovač nemá pripojený žiadny rezistor na zvýšenie zosilnenia, nakoľko minimálne zosilnenie INA122 je päťkrát bez použitia rezistora. Druhý rezistor R13 slúži pre prúdovú sondu, ktorá bude merať napätie na rezistore priamo proti GND1. Oba rezistory majú odpor jeden Ohm, čo prakticky znamená jednoduchý prevod $1mA = 1mV$. Celková schéma šumového žiariča je na Obr.7.10. Návrh plošného spoja a obsadzovací výkres je na Obr.7.11 a Obr.7.12. Konštrukcia plošného spoja žiariča je na Obr.7.13. Pre vyvedenie signálu z rezistora R13, ktorý slúži na meranie prúdu nebola použitá svorkovnica ale len vyvedené vodiče z plošného spoja, kôli minimalizácii prechodových odporov, ktorý by mohli skresľovať meranie.

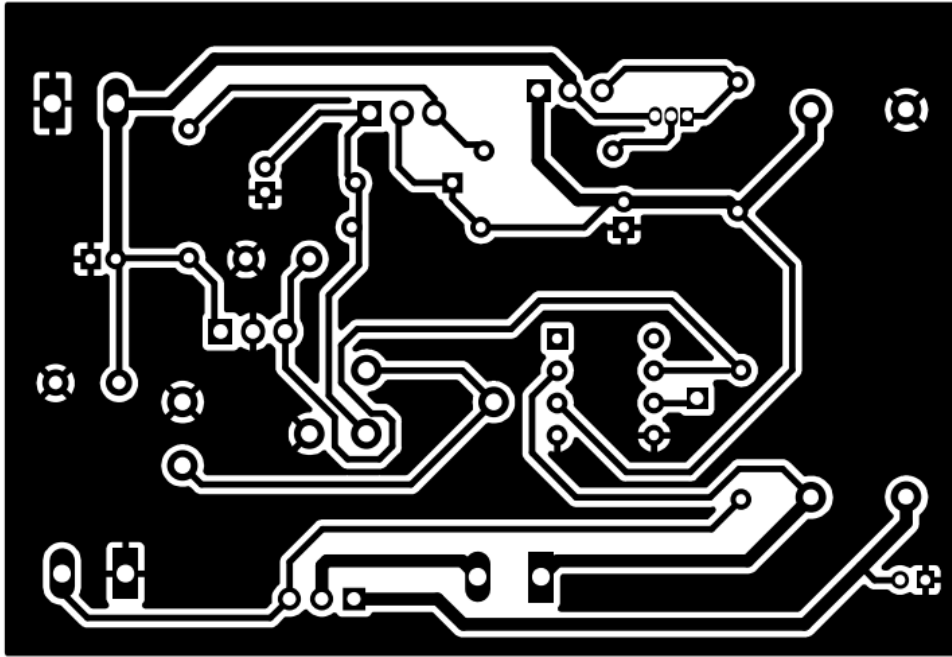


Obr. 7.10: Schéma zapojenia šumového žiariča

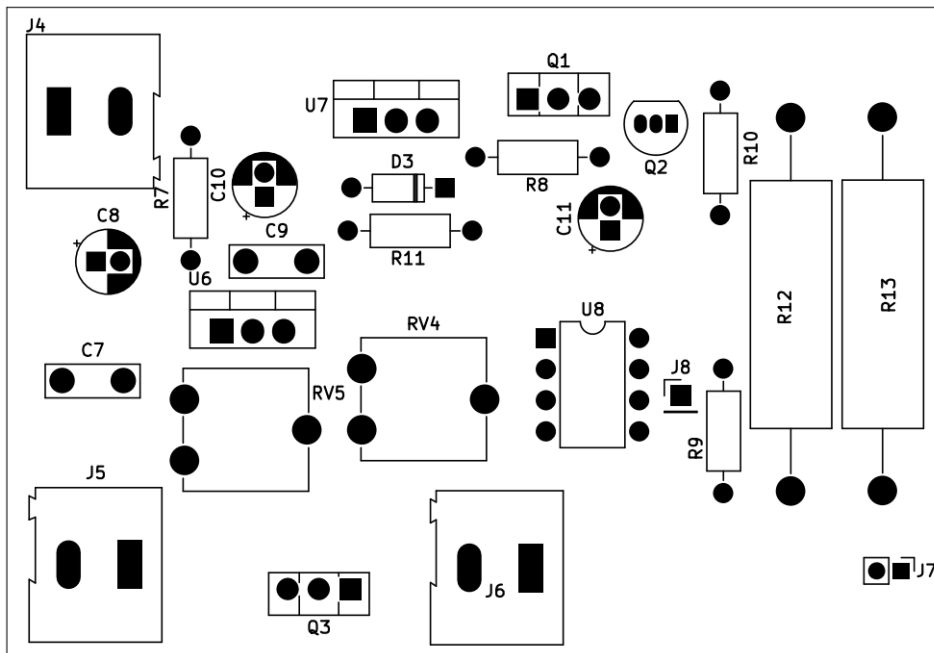
Návrh plošného spoja je realizovaný na jednostrannom plošnom spoji, nakoľko nieje potrebné uvažovať SMD súčiastky a celé zapojenie je prakticky nízkofrekvenčné. Na regulačný tranzistor BD237 je umiestnený malý chladič z dôvodu strát na tranzistore.

7.4 Modulačný signál

Pre modulovanie šumového žiariča je potrebné priviesť na optočlen kladný obdĺžnikový signál, pretože LED dióda v optočlene je fixne zapojená katódou k 0V, čo znamená, že je ovládaná kladným napätím na anóde. Prúd LED diódy je v zapojení rádiometra rezistorom obmedzený na 20 mA pri napätí +5 V, čo stačí na úplné otvorenie fototranzistora na výstupe optočlena. Tvar modulačného signálu by mohol byť aj iného typu avšak pri obdĺžnikovom signále je možné jasne usúdiť, kedy šumový žiarič vyžaruje s plným výkonom a kedy je naopak vypnutý. Modulačný signál použitý na moduláciu šumového prúdu žiariča a tak aj elektromagnetického šumového poľa

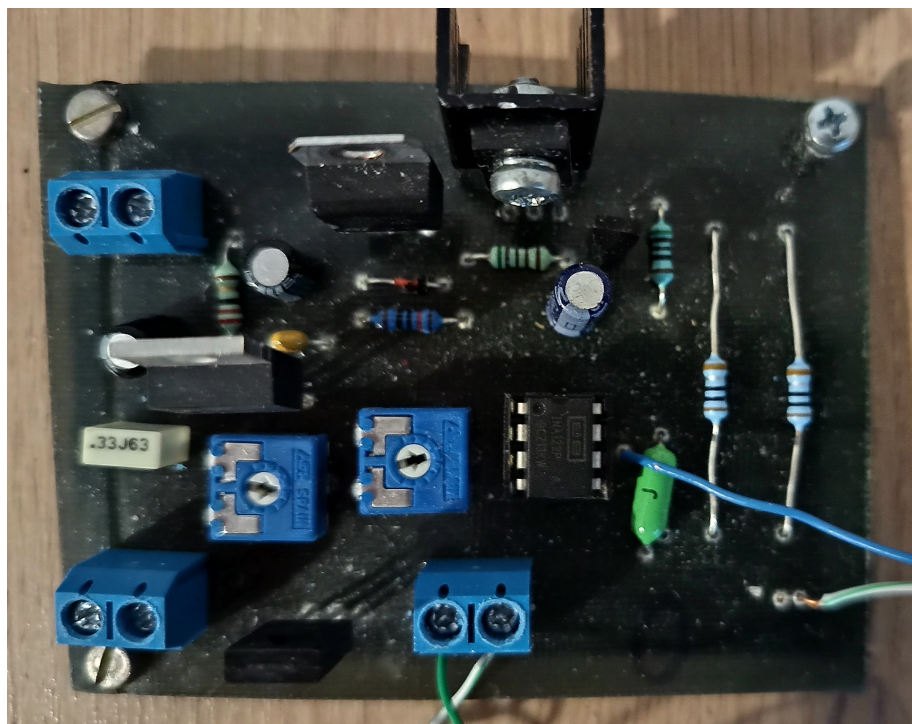


Obr. 7.11: Návrh plošného spoja napájania šumového žiariča



Obr. 7.12: Osadzovací výkres šumového žiariča

môže byť privádzaný z akéhokoľvek externého generátora signálov. V tomto prípade bola pre získanie externého modulačného signálu použitá platforma Arduino s modulom



Obr. 7.13: Konštrukcia plošného spoja napájania šumového žiariča

UNO, ktorého základ tvorí mikroprocesor Atmega328P od firmy Atmel. Tento modul má svoje vlastné vývojové prostredie, kde je ho možné použiť pre programovanie modulu jazyk C alebo C++ [28]. Program pre generovanie obdĺžnikového signálu s ovládaním frekvencie je už predpripravený vo vývojovom prostredí ako jeden z príkladov. Arduino UNO má aj analógové vstupné piny, ktoré by sa dali v prípade potreby využiť na snímanie výstupnej hodnoty rádiometra, bolo by však potrebné vyriešiť zápornú hodnotu rádiometra pri veľmi slabých signáloch. Hodnoty by následne mohli byť uložené do pamäti a exportované pre vytvorenie grafov z meraní v Matlabe alebo Excely. Práve Matlab poskytuje vhodné prostredie na spracovávanie numerických dát. Nakoľko je popularita platformy Arduino vysoká, Matlab má implementované vlastné moduly pre priamo ovládanie dosky Arduina prostredníctvom grafického rozhrania priamo v Matlabe. Pre generovanie signálu bol preto použité simulačné prostredie Simulink. Toto prostredie poskytuje nástroje na vytvorenie obdĺžnikového generátora impulzov v rámci simulácie a následne po počiatocnej konfigurácii rozhrania a pripojení Arduina cez USB rozhranie k počítaču, je možné implementovať kód vytvorený v rámci simulácie do fyzickej dosky Arduina [29]. Takto je možné vytvoriť fyzický obdĺžnikový signál pomocou programu Matlab a platformy Arduino UNO, ktorý je možné pohodlne ovládať cez grafické rozhranie v rámci určitých limitov.

8 Experimentálne overenie systému

Experimentálne overenie systému pozostávalo z experimentov vykonaných na realizovanom systéme bez použitia materiálových vzoriek. Následne sa vykonali merania na náhodne vybraných materiálových vzorkách. Aby bolo možné vyhodnotiť merania, všetky vybrané materiálové vzorky mali jednoduchý geometrický tvar v podobe kvádra, pričom výška a šírka niekoľkonásobne prevyšovala ich hrúbku. Materiálové vzorky boli brané ako homogénne a izotropné, aby boli podmienky vyhodnocovania čo najjednoduchšie. Experimentami boli overené vlastnosti týchto vzoriek ako je priepustnosť a odrazivosť.

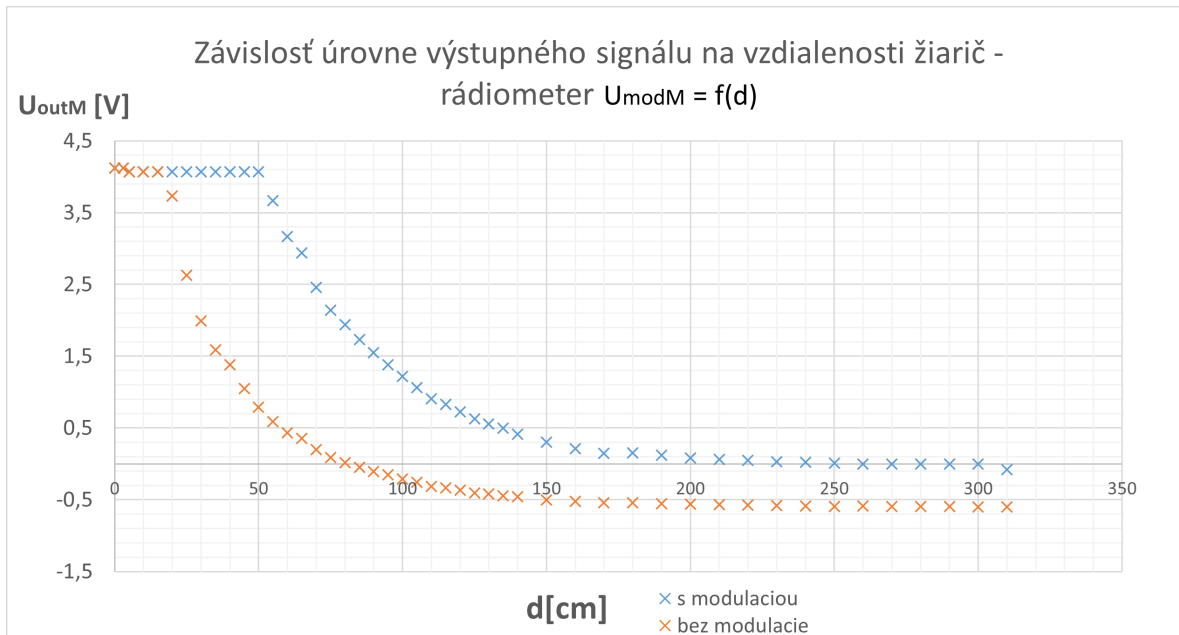
8.1 Overenie parametrov systému

Overenie parametrov systému pozostáva zo série meraní na navrhnutom systéme bez materiálovej vzorky. Tieto merania slúžili ako referenčné merania systému, aby sa zistili referenčné hodnoty, ku ktorým sa následne vzťahujú hodnoty namerané na vzorkách. Taktiež sa zisťovali limity systému v daných konfiguráciách. Meranie výstupného napätia rádiometra bolo vykonávané pomocou osciloskopu Fnrissi-1014D. Pri každom meraní bola odčítaná efektívna hodnota napätia na výstupe rádiometra. Po zmenách konfigurácie medzi vypnutou a zapnutou moduláciou bol vždy ponechaný čas približne 30s až 1 minúta, aby sa šumový žiarič teplotne stabilizoval a hodnota šumového prúdu a tým aj vyžiarenej intenzity zostala konštantná. Pri meraní šumového prúdu bol použitý rezistor R13 v emitore tranzistora Q3, na ktorom bolo merané napätie druhým kanálom osciloskopu. Nakoľko hodnota tohoto rezistora je 1Ω , hodnota napätia zodpovedala hodnote meraného prúdu.

8.1.1 Meranie úrovne prijatého signálu v závislosti na vzdialenosti od žiariča

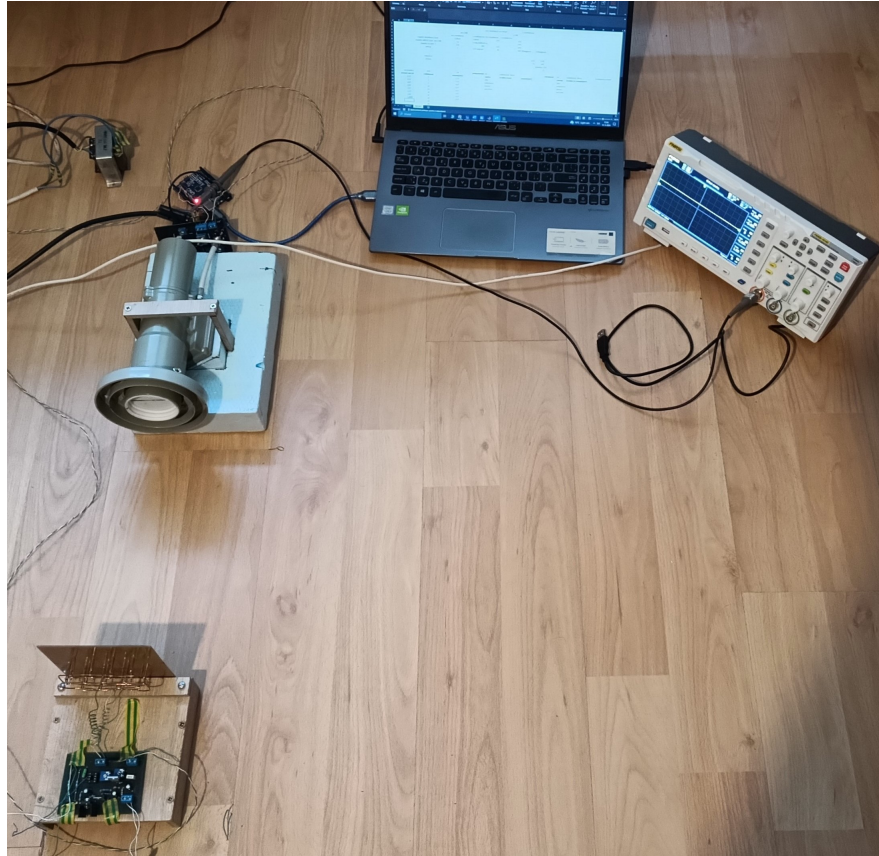
Prvé základné meranie je meranie úrovne výstupného signálu rádiometra v závislosti na vzdialenosti od šumového žiariča. So zvyšujúcou sa vzdialenosťou je možné predpokladať riedenie vyžiarenej energie spôsobené šírením do priestoru, čo sa prejaví ako útlm prijatého signálu. Meranie bolo vykonané pri fixnej pozícii rádiometra a variabilnej pozícii žiariča, pričom ich fázové stredy antény boli umiestnené priamo oproti sebe pozdĺž osy posuvu. V tomto smere by mali mať rádiometer aj šumový žiarič najväčší zisk. Všetky následné merania boli taktiež realizované iba v tomto nastavení s maximálnym ziskom. Táto konfigurácia by mala mať za následok najlepšie výsledky, čo možno interpretovať ako najpomalšie klesanie výstupného napätia rádiometra so zväčšujúcou sa vzdialenosťou. Vzdialenosť šumového žiariča od rádiometra bola

postupne zväčšovaná po ekvidistantných krokoch s dĺžkou 5 cm, pričom sa pri každom kroku zaznamenala hodnota výstupného napätia rádiometra. Na žiariči bol nastavený rovnaký prúd počas celého merania, aby nedošlo ku skresleniu výsledkov. Tento postup bol aplikovaný aj v nasledujúcich meraniach. Toto meranie malo za cieľ taktiež posúdiť účinnosť použitia modulácie šumového žiariča. Na obrázku nižšie je zobrazený graf, kde sú porovnané výstupné napätia rádiometra bez použitia a s použitím modulácie šumového žiariča. Z grafu nameraných hodnôt na Obr.8.1



Obr. 8.1: Závislosť výstupnej úrovne rádiometra na vzdialenosti od šumového žiariča

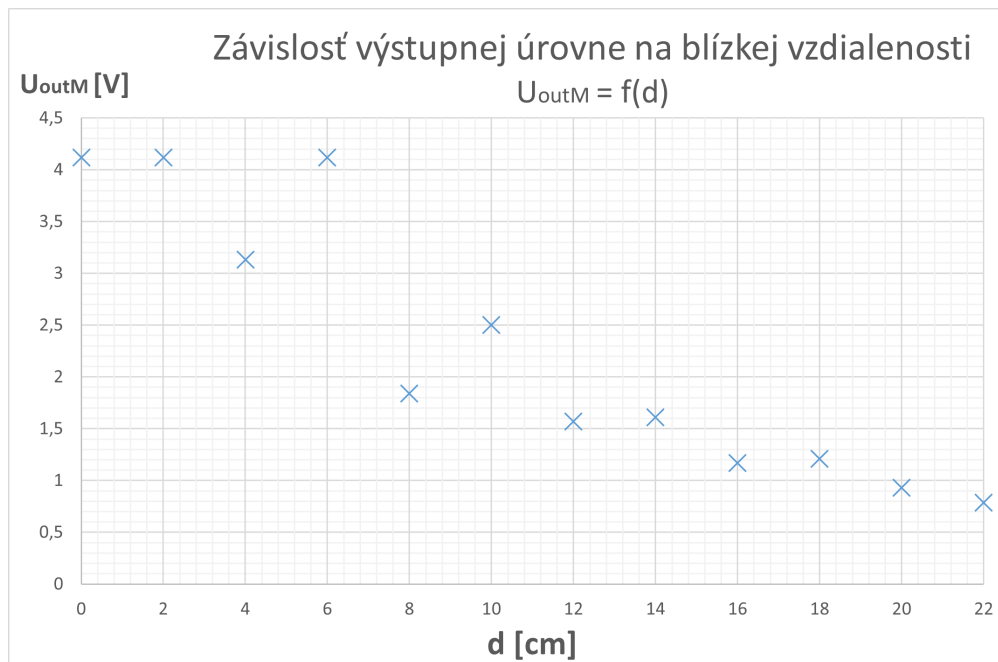
vyplýva, že použitie modulácie má priaznivý vplyv na citlivosť detektoru. Pri vzdialenosti okolo 50 cm je úroveň výstupného signálu bez modulácie okolo 0,7 V, ale pri použití modulácie sa úroveň pri tejto vzdialenosti stále drží na maximálnej hodnote 4,12 V. Výstup integrátora nedosahuje plné napájacie napätie 5 V z konštrukčného dôvodu operačného zosilňovača TL071, ktorý nie je typu "rail-to-rail". Konštantné hodnoty pri krátkych vzdialenostiach do 50 cm znamenajú že rádiometer zachytáva stále dostatočne veľký výkon na to aby mohla byť na výstupe maximálna možná hodnota napätia. Výstup je teda saturovaný, čo je spôsobené saturáciou aktívneho filtra. Tento filter je zodpovedný aj za záporné hodnoty napätia pri najväčšej meranej vzdialenosti. Minimálne hodnoty, ktoré boli namerané bez použitia žiariča, boli -0,599 V bez modulácie a -0,08 V s moduláciou. Znamená to, že na vzdialenosti 310 cm od žiariča je rádiometer prakticky takmer na limite svojej citlivosti. Z grafu sa dá ďalej vyčítať že výstupná hodnota logaritmicky klesá s rastúcou vzdialenosťou. To môže byť vysvetlené stratami spôsobenými šírením vo voľnom priestore.



Obr. 8.2: Fotografia merania výstupnej úrovne rádiometra pri vzdialenosti 30 cm

Pre overenie teoretických predpokladov o povahe šumového elektromagnetického poľa bol prevedený ďalší experiment na rovnakom princípe, ktorý skúmal výstupné napätie rádiometra v závislosti na vzdialenosti od žiariča. Tentokrát však bola vzdialenosť len 0 až 22 cm. Dôvodom tohoto experimentu bolo overenie, či na krátku vzdialenosť vzniká stojaté vlnenie medzi žiaričom a rádiometrom v dôsledku interferencie vysielaných vln žiariča a odrazených vln od rádiometra. Pri tomto pokuse bol obmedzený prúd žiariča na 35 mA, aby nedochádzalo k saturácii pri veľmi krátkych vzdialenostiach.

Stojaté vlnenie harmonicky budenej vlny sa principiálne vyznačuje statickou hodnotou útlmu signálu v určitom mieste priestoru, pokiaľ je miesto práve v uzle vlnenia. Naopak, pokiaľ ide o kmitňu stojatých vln, v určitom mieste priestoru bude intenzita dosahovať maximálnej výchylky interferujúcich vln. Prakticky by sa tento jav mohol opísať ako opakujúce sa úniky signálu v závislosti na polohe prijímača alebo vysielača, pričom útlmy sa periodicky opakujú na vzdialenosti vždy $\lambda/2$. Obr.8.3 zobrazuje výstupnú úroveň rádiometra v závislosti do 22 cm s krokom po 2 cm. Z obrázku je vidieť že výstup rádiometra spĺňa vyššie uvedený popis



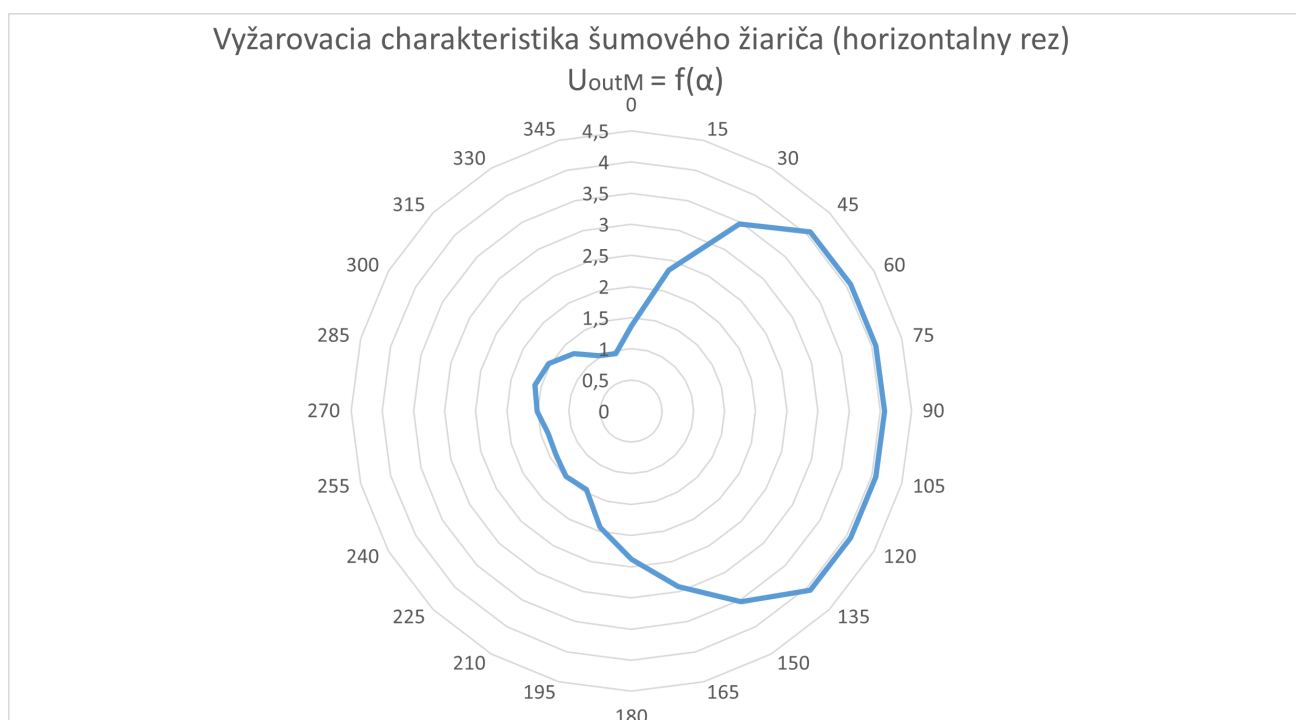
Obr. 8.3: Závislosť výstupnej úrovne rádiometra na krátkej vzdialenosti od šumového žiariča

stojatého vlnenia, pretože útlm signálu sa prejavuje približne každé 4 cm, čo je presne vzdialenosť $\lambda/2$. Globálny pokles výstupného napätia je spôsobený stratami šírením popísaným v predchádzajúcom experimente. Tento výsledok sa nezhoduje s teoretickými predpokladmi popísanými v 3.kapitole, nakoľko podľa tohoto predpokladu malo mať výstupné napätie iba klesajúcu charakteristiku, bez fluktuácií. Dôvodom by mohla byť interferencia priamej a odrazenej vlny tak, ako je tomu u harmonického signálu. Vyžiarený signál šumovým žiaričom má určitú šírku pásma a nieje úplne stochastický. Z teoretických poznatkov vyplýva, že čím užšia je šírka pásma, tým je signál viac koherentný, čoho dôkazom je monochromatický laser. Šírku pásma šumového žiariča obmedzuje už budiaci šumový signál z diód, ktorého šírka pásma je limitovaná parazitnými kapacitami a indukčnosťami samotných diód. Ešte väčšiu selekciu vytvára samotná dipólová anténa. Antény sú polvlnné pre frekvenciu 3,75 GHz, kde majú zisk v prednom smere 2,15 dB vo voľnom priestore. Pre nižšie frekvencie už dipól nieje polvlnný, pretože dĺžka polvlny je väčšia ako celý dipól, čo spôsobí že sa nevyžiari rovnaké množstvo energie ako pri polvlnnom dipóle. Pri vyšších frekvenciách je dĺžka polvlny menšia ako celý dipól, čo spôsobí že vyžarovacia charakteristika bude mať postranné laloky, čo zhorší smerovosť v smere maximálneho zisku rádiometra. Z toho vyplýva, že opäť bude prichádzať k rádiometru menšie množstvo energie, ako tomu bolo pri polvlnnom dipóle. Týmto spôsobom sa šírka pásma obmedzí, čo spôsobí, že žiarenie bude mať vyššiu koherenciu a teda aj vyšší

predpoklad pre vznik inteferencií a stojatého vlnenia.

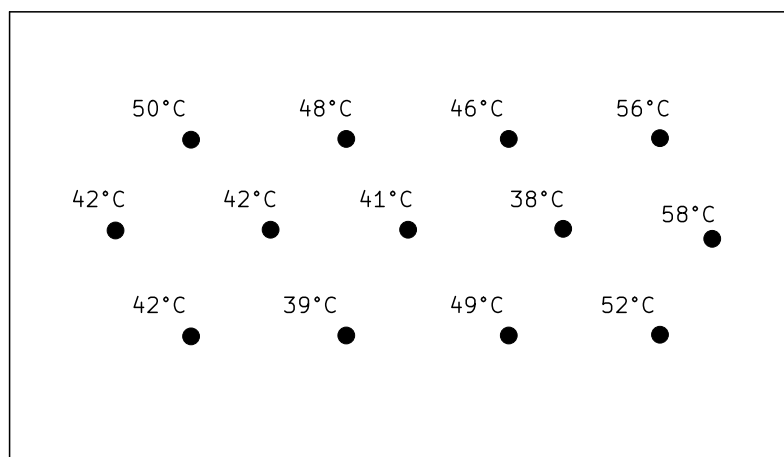
8.1.2 Meranie vyžarovacej charakteristiky

Meranie vyžarovacej charakteristiky malo za cieľ zistiť úroveň vyžarovania šumového žiariča v závislosti od uhla natočenia od osy žiariča, ktorá prechádza fázovým stredom. Žiarič bol vzdialený 30 cm od rádiometra z dôvodu vytvorenia približne rovinatej vlny. Meranie prebiehalo posuvom šumového žiariča okolo rádiometra s krokom 15° , kým nebola opísaná celá kružnica, aby mohla byť zmeraná celková predozadná charakteristika vyžarovania v horizontálnom reze. Vertikálna charakteristika nebola meraná, nakoľko sa v ostatných experimentoch neuvažuje posuv vo vertikálnom smere. Namerané hodnoty sú na Obr.8.4



Obr. 8.4: Vyžarovacia horizontálna charakteristika šumového žiariča (v strede hodnoty výstupného napätia U_{outM})

Z obrázku je vidieť, že vyžarovacia charakteristika nie je úplne symetrická v prednom smere. Z tohoto dôvodu bol spravené teplotné meranie na povrchu diód pomocou teplotného čidla a multimetra AX-588B. Cieľom bolo zistiť, či niektoré diódy nie sú viac zatažené ako ostatné, a tým vyžarujú menší výkon. Diódy, ktoré by mali byť viac zatažené, musia mať aj väčšiu teplotnú stratu oproti menej zataženým diódam. Výsledky teplotného merania sú na Obr.8.5



Obr. 8.5: Schématické zobrazenie teplôt na diódach šumového žiariča (pohľad z predu)

Z Obr. 8.5 je vidieť, že 3 diódy na pravej strane s teplotami 56°C, 58°C a 52°C majú minimálne o 6°C vyššiu teplotu v porovnaní s diódami na rovnakých pozíciách ale na ľavej strane. Nižšia teplota diód na ľavej strane, sedí s nižšou výstupnou úrovňou na vyžarovacej charakteristike v oblasti od 0° do 30°. Tento jav teda môže preto byť spôsobený práve nerovnomerným rozdelením prúdu medzi diódami. Nerovnomerné rozdelenie môže byť spôsobené malými odchýlkami v zenerovom napätí medzi jednotlivými diódami, ktoré sú zapojené paralelne. Tento problém by bolo možné vyriešiť sériovým zapojením diód. V prípade trinástich diód so zenerovým napätím 18V by si však napájanie vyžadovalo až okolo 234 V jednosmerných, čo je relatívne vysoká a ťažko konštruovateľná požiadavka.

8.1.3 Referenčné meranie pre posúdenie odrazivosti materiálov v závislosti na uhle dopadu

Z Fresnelových rovníc je možné vyvodiť dve skutočnosti pre odrazivosť materiálov. Prvá hovorí, že úroveň odrazenej energie od rozhrania dvoch prostredí sa bude meniť v závislosti od uhla dopadu elektromagnetickej vlny na rozhranie. Druhá hovorí, že pri rovnakom uhle dopadu, môže byť rôzna odrazivosť pre dva rôzne materiály, čo vyplýva zo závislosti odrazivosti na indexe lomu prostredí. Aby bolo možné vyhodnotiť odrazivosť rôznych materiálov v závislosti na rozdielnom uhle dopadu, je

Uhol od kolmice rozhrania[°]	U_{outM} [V]
90	3,38
75	2,43
60	1,83
45	0,929
30	0,483
15	0,322
0	0,33

Tab. 8.1: Výstupné hodnoty rádiometra v závislosti na vychýlení od osy žiariča

potrebné zmerať najskôr úroveň prijímaného signálu bez materiálovej vzorky. Teda prakticky zistiť, koľko žiarenia dokáže rádiometer zachytiť pri určitom pootočení šumového žiariča. Tento pokus je dôležitý z dôvodu, že šumový žiarič má dosť širokú horizontálnu vyžarovaciu charakteristiku a preto sa dá predpokladať, že pri väčších uhloch α , kedy je priama viditeľnosť medzi fázovými stredmi rádiometra a žiariča väčšia, bude rádiometer zachytávať signál aj bez vzorky materiálu, od ktorej by sa mal signál odrážať. Tým sa zvýši úroveň prijatej energie rádiometrom nad hodnotu, ktorá by bola nameraná čisto iba po odraze od vzorky. V princípe ide o mnohocestné šírenie žiarenia k rádiometru, pričom cesta priamej viditeľnosti je v tomto prípade nežiadúca. Pre korektné hodnoty odrazivosti je potrebné zistiť, akú minimálnu hodnotu signálu bude rádiometer zachytávať pri rôznych uhloch natočenia. Získané hodnoty sa použijú pri výpočte odrazivosti materiálov ako korekcia. Pribeh pokusu pozostával z merania úrovne výstupného signálu rádiometra pri postupnom natáčaní šumového žiariča z polohy priamo oproti sebe, do polohy ostrejších uhlov, s krokom 15° . Rádiometer aj žiarič budú mať svoje osy symetrie namierené do stredobodu označujúceho stred materiálovej vzorky, od ktorého budú vzdialené 30 cm. Pri nulovom uhle bola situácia rovnaká ako v experimente s postupným oddialením žiariča, čo dokazuje aj zhodná nameraná hodnota 3,38V. Táto hodnota vyjadruje intenzitu prijatého výkonu pri plnej priamej viditeľnosti na vzdialenosť 60 cm. Postupným natáčaním sa šumový žiarič posúval zo zorného uhla rádiometra a zmenšovala sa väzba spôsobená priamou viditeľnosťou. Namerané hodnoty sú v Tab.8.1. Z tabuľky je vidieť, že so zmenšujúcim sa uhlom sa zmenšovalo aj výstupné napätie. To je spôsobené vychylovaním mimo maxim vyžarovacích charakteristík oboch prístrojov. Meranie pri 0° je skreslené, pretože rádiometer nie je možné spolu s prijímačom umiestniť na to isté miesto.

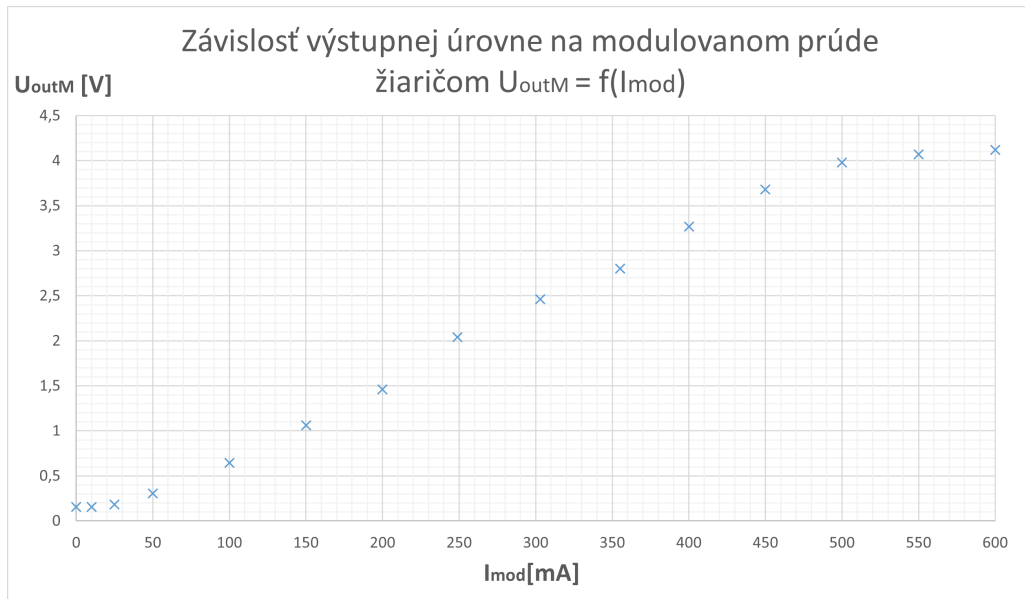
8.1.4 Meranie závislosti signálu rádiometra na budiacom prúde žiariča

Ako vyplýva z teoretickej časti, veľkosť šumového poľa je závislá na prúde pretekajúcim PN prechodom šumového zdroja. Pre experimentálnu činnosť je namieste zistiť, aká bude výstupná úroveň napätia rádiometra pri rôznom budiacom prúde žiariča. Testovaná bude konfigurácia s moduláciou, ktorá je viacej dôležitá pre väčšiu citlivosť rádiometra a tým väčšej použiteľnosti. Pre konfiguráciu bez modulácie by mala mať charakteristika rovnaký priebeh, akurát by mala dosahovať maximálnej hodnoty pri vyššom prúde. Meranie prebiehalo pri konštantnej vzdialenosti 60 cm od rádiometra. Šumový žiarič bol umiestnený v opäť v osi fázového stredu rádiometra. Oscilogram meraného prúdu a výstupu rádiometra je na Obr.8.7. Pre porovnanie vplyvu synchronnej detekcie na citlivosť rádiometra je pripojený aj oscilogram prúdu bez modulácie a prislúchajúceho výstupu rádiometra na Obr.8.8. Po prepnutí do stavu bez modulácie sa zvýšila stredná hodnota prúdu, čo spôsobilo aj nárast efektívnej hodnoty a tým aj nárast teploty zenerových diód. Z tohoto dôvodu klesla maximálna hodnota prúdu, čo sa prejavilo aj na výstupnej úrovni rádiometra, avšak z Obr.8.8 je vidieť že tento pokles je až príliš veľký vzhľadom na nižšie merané hodnoty v grafe na Obr.8.6. Tento prídavný pokles je možné vysvetliť práve absenciou dodatočného zisku, ktorú poskytuje demodulátor v stave synchronnej detekcie.

Ako vyplýva z grafu na Obr. 8.6 pri zvyšujúcom sa prúde sa zvyšuje aj výstupné napätie rádiometra. Okolo hodnoty 550 mA sa rast spomaľuje a okolo hodnoty 600mA už napätie takmer nerastie. Zastavenie rastu je v tomto prípade spôsobené saturáciou výstupu rádiometra. Avšak ako ukazuje teoretická hodnota prúdovej šumovej hustoty v závislosti na budiacom prúde na Obr.8.9, podľa vzťahu (1.2), závislosť má rastúci charakter, ale rast sa spomaľuje so zväčšujúcim sa budiacim prúdom. Preto je možné predpokladať postupné znižovanie výstupnej úrovne rádiometra pri narastaní budiaceho prúdu žiariča tak ako je tomu na Obr.8.6.

8.2 Meranie priepustnosti materiálovej vzorky

Meranie priepustnosti materiálu bolo vykonané vložení vzorky medzi rádiometer a šumový žiarič, ktoré boli od seba vzdialené 60 cm. Táto vzdialenosť bola vybratá na základe splnenia podmienky rovinnosti šíriacej sa vlny a vzdialenej zóny, ktorá je pre polvlnný dipól dĺžky 4 cm vo vzdialenosti 12 cm od antény. Taktiež bol braný ohľad na výstupnú úroveň rádiometra, ktorá bola v tejto vzdialenosti bez pridaného útlmu 3,17 V, čo vytvára dostatočne veľkú rezervu aj pre detekciu vzorky s väčším útlmom. Meranie bolo uskutočnené s moduláciou šumového signálu a bez modulácie, aby sa zistil prípadný vplyv modulácie pri ožarovaní materiálovej vzorky. Do výpočtu



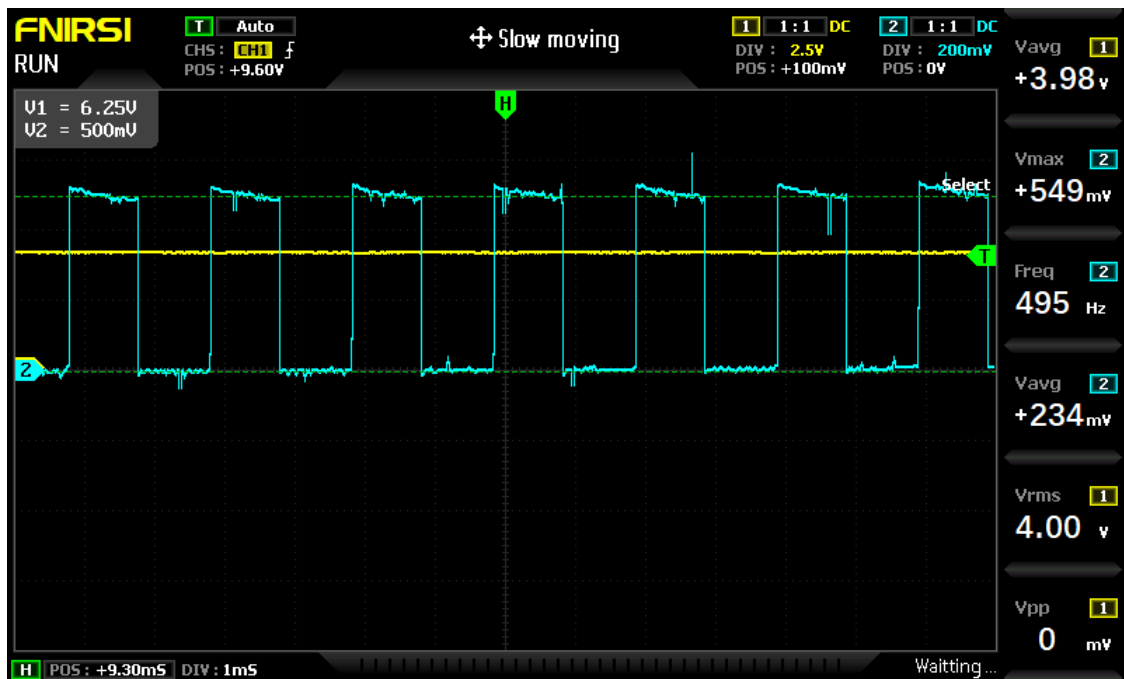
Obr. 8.6: Závislosť výstupného napätia rádiometra na budiacom prúde žiariča

priepustnosti je potrebné zahrnúť ako referenčné hodnoty pri priamej viditeľnosti, v opačnom prípade by boli výsledky skreslené. Výpočet nameranej priepustnosti v oboch konfiguráciách je nasledovný:

$$T = \frac{X - X_{ref}}{X_{max} - X_{ref}}, \quad (8.1)$$

kde, X je nameraná hodnota na výstupe rádiometra, X_{ref} je nameraná hodnota rádiometra bez šumového poľa a X_{maxM} je nameraná hodnota rádiometra bez vzorky. V prípade použitia modulácie je $X_{refM} = -0,035V$ a $X_{max} = 3,37V$. Pre šumový signál bez modulácie sú hodnoty nasledovné: $X_{ref} = -0,614V$ a $X_{max} = 0,43V$.

Z Tab. 8.2 je vidieť že nameraná priepustnosť s moduláciou a bez modulácie má podobné hodnoty. Medzi najviac priepustné hodnoty patria materiály ako kartón, polystyrén a penená PVC doska, viac ako 95%. Naopak, najmenšiu priepustnosť mal podľa očakávania plech, nakoľko kovový materiál má vysokú odrazivosť a teda nízku priepustnosť. Nízku priepustnosť mal aj vlhčený kartón, čo dokazuje, že vysoká koncentrácia vody robí materiál vodivým, a tým aj viacej odrazivým. Je taktiež vidieť, že pri použití dvojnásobnej hrúbky materiálu priepustnosť klesne. Avšak zatiaľ čo pri dreve bol rozdiel iba 2%, v prípade kartónu je to až 37%. Tieto výsledky naznačujú, že materiály, ktoré majú vysokú priepustnosť, majú nízku úroveň absorpcie pri danej hrúbke, nakoľko zmeraná úroveň zahŕňa straty šírením vlny v materiáli. Skutočná priepustnosť rozhrania je preto vo všetkých prípadoch o niečo vyššia. Túto hypotézu podporuje aj predpoklad, že žiarenie prekonáva rozhranie dvakrát, smerom pri vstupe do vzorky a taktiež pri výstupe zo vzorky, pričom aj pri



Obr. 8.7: Oscilogram modulovaného prúdu a výstupu rádiometra

druhom prechode vznikne určitý odraz, ktorý sa v konečnom dôsledku prejaví ako mierny útlm žiarenia.

Pre zistenie priepustnosti materiálových štruktúr bolo realizované meranie priepustnosti na kombináciách niektorých dvoch typoch materiálových vzoriek. Vzorky boli vybrané náhodne. Meranie bolo vykonané v dvoch variantách, v jednej boli vzorky postavené za sebou vo vzdialenosti 10 cm a v druhej tesne pri sebe. Toto rozdelenie malo za cieľ zistiť prípadne rozdiely v priepustnosti, ak nie sú materiály tesne pri sebe a zhodnotiť tak, či sa útlmy jednotlivých materiálov iba sčítajú alebo sú prítomné aj iné faktory, ktoré utlmujú vysielaný signál.

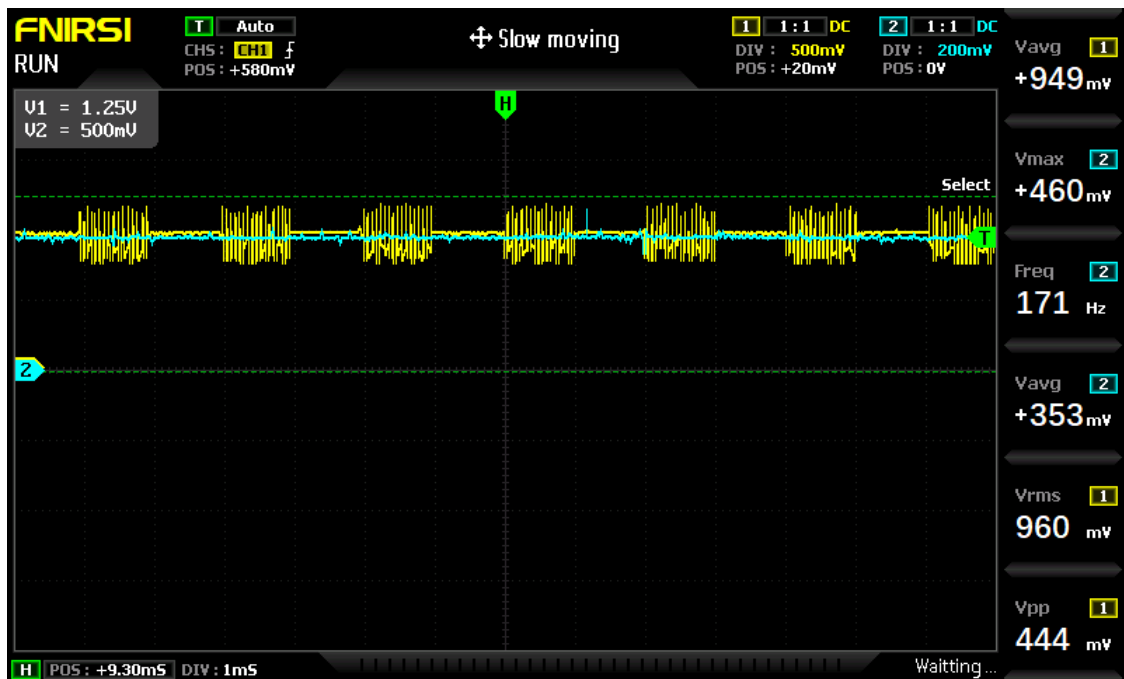
Výsledky z Tab.8.3 ukazujú, že vzdialenosť medzi vzorkami má vplyv na celkovú priepustnosť. Pri vzdialenosti 10 cm medzi vzorkami je celková priepustnosť týchto materiálových štruktúr vyššia ako keď je štruktúra zložená z dvoch materiálových vzoriek tesne za sebou. V prvom prípade, penená PVC doska-drevená dyha, je vidieť, že pri vzduchovej medzere 10 cm medzi vzorkami je priepustnosť 0,92, čo je hodnota, ktorá je medzi hodnotami priepustností vzoriek samostatne. Pri nulovej vzdialenosti je však už priepustnosť 0,64, čo je menej ako najnižšia priepustnosť z kombinácie, teda menej ako drevená dyha samostatne (0,86).

vzorka	VxŠxH [mm]	U_{outM} [V]	T_{mod} [-]	U_{outD} [V]	T_{det} [-]
plech	420x370x1,5	0,145	0,06	-0,533	0,08
polystyrén	230x350x8	3,09	0,97	0,37	0,94
kartón	300x400x3	3,05	0,96	0,35	0,92
porcelán	250x400x8	2,28	0,72	0,06	0,65
drevo	320x380x16	2,34	0,74	0,13	0,71
penená PVC doska	220x350x5	3,11	0,98	0,38	0,95
drevená dyha	270x350x3	2,74	0,86	0,27	0,84
extrudovaný polystyrén	170x350x50	3,23	1,02	0,4	0,97
polyetylénová pena	280x380x5	3,13	0,29	0,37	0,94
žiadna vzorka	-	3,17	-	0,43	
vlhčený kartón	300x400x3	0,909	0,29	-0,31	0,29
2x drevo	320x380x32	2,26	0,72	0,11	0,69
2x karton	320x380x6	1,85	0,59	-	-

Tab. 8.2: Merané hodnoty priepustnosti

vzorky	U_{outM10} [V]	T_{10} [-]	U_{outM0} [V]	T_0 [-]
penená PVC doska-drevená dyha	2,92	0,92	2,04	0,64
drevo-extrudovaný polystyrén	2,4	0,76	1,53	0,48
porcelán-kartón	2,18	0,69	1,47	0,49
extrudovaný polystyrén- penená PVC doska	3,07	0,97	2,04	0,64
extrudovaný polystyrén- penená PVC doska-drevo	2,46	0,78	1,66	0,52

Tab. 8.3: Merané hodnoty priepustnosti materiálovej štruktúry



Obr. 8.8: Oscilogram nemodulovaného prúdu a výstupu rádiometra

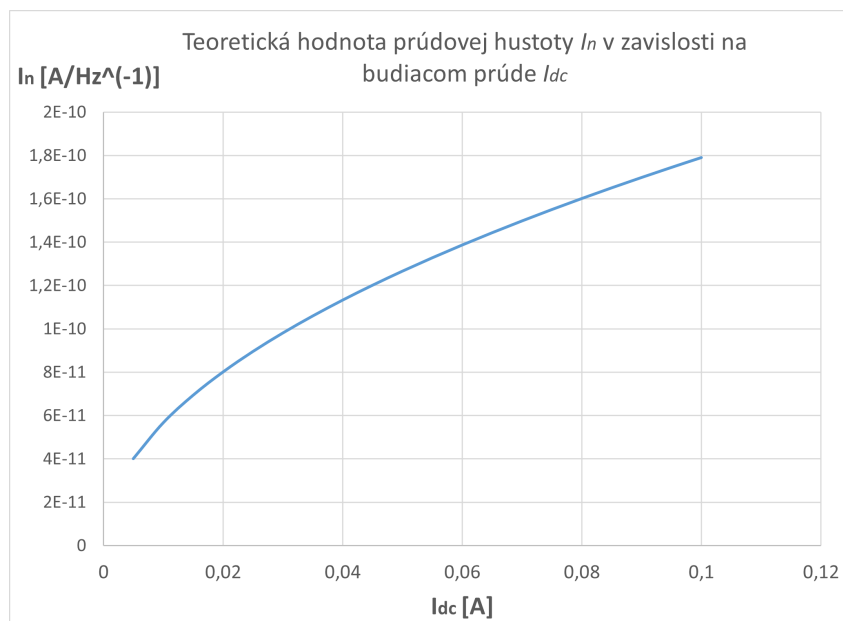
8.3 Meranie odrazivosti materiálovej vzorky

Meranie bolo vykonané na rovnakých vzorkách materiálu, ako merania priepustnosti. Žiarič bol nasmerovaný do stredu experimentálnej plochy pod uhlom 45° a zároveň bola aj vzorka umiestnená na stred experimentálnej plochy. Bola zachovaná vzdialenosť 30cm medzi stredom antény a stredom materiálovej vzorky a rovnaká vzdialenosť medzi stredom antény rádiometra od stredu vzorky. Dôvodom tejto zvolenej vzdialenosti bolo opäť dodržanie prijímania vo vzdialenej zóne. Výpočet nameranej odrazivosti je daný vzťahom:

$$T = \frac{X - X_{ref}}{X_{max} - X_{ref}}, \quad (8.2)$$

kde, X je nameraná hodnota na výstupe rádiometra, X_{ref} je nameraná hodnota rádiometra bez šumového poľa a X_{max} je nameraná hodnota rádiometra bez vzorky.

Z merania odrazivosti vyplýva, že odrazivosť materiálov pri zvolenom uhle nedopĺňa hodnoty priepustnosti tak aby bol výsledný súčet koeficientov rovný jednej. Z tohto zistenia je možné odvodiť, že odrazivosť je pri zvolenom uhle žiariča a rádiometra iná, ako pri meraní priepustnosti kde bol uhol medzi žiaričom a osou kolmou na rozhranie 0° . Tento predpoklad potvrdzuje teoretické poznatky dané Fresnelovými rovnicami, ktoré hovoria, že odrazivosť je závislá od uhlu dopadu vlny na rozhranie. Pre tento teoretický predpoklad bolo ďalej vykonané samostatné meranie, ktoré malo za cieľ



Obr. 8.9: Teoretická závislosť prúdovej šumovej hustoty na modulovanom budiacom prúde žiariča

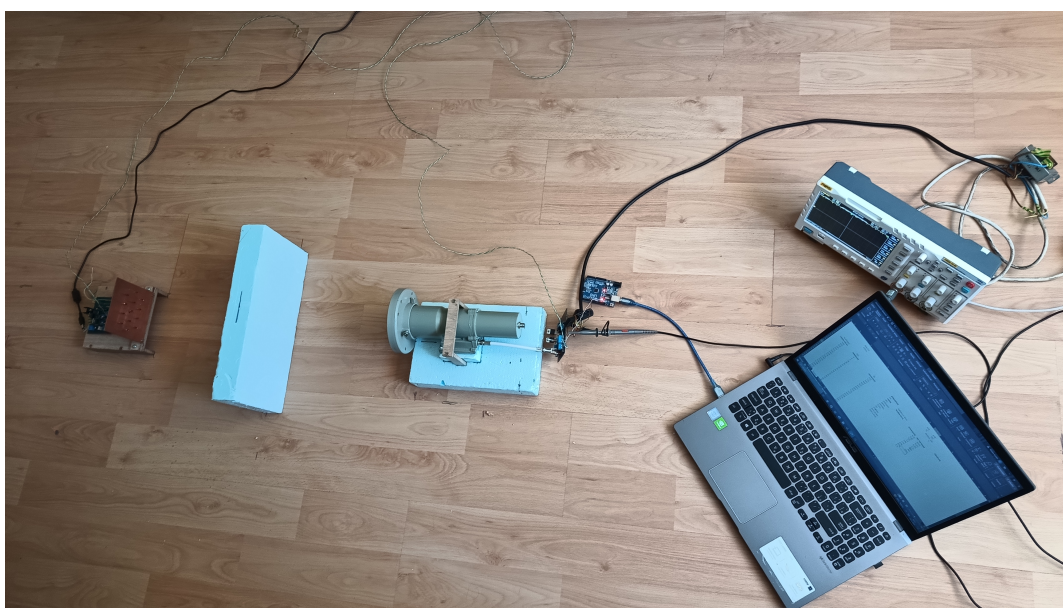
porovnať odrazivosť dreva a extrudovaného polystyrénu (EPS) pri rôznych uhloch dopadu žiarenia. Z Tab.8.5 je možné vyvodit' dva závery. Prvý je, že odrazivosť EPS je pri všetkých uhloch natočenia celkovo veľmi nízka, čo je spôsobené jeho materiálovými vlastnosťami. Druhým je potvrdenie teoretických predpokladov, že odrazivosť sa mení s uhlom dopadu vlny, pričom pre rôzne indexy lomu je rôzna. Z Obr.8.13 je vidieť, že odrazivosť dreva je najväčšia pri približne 75°. Pre EPS je zaznamenaný mierny nárast pri 30°. Záporné hodnoty odrazivosti v tomto aj predošlom meraní sú spôsobené chybou merania. Pri tomto type materiálu sa však objavuje akási systematická chyba. V tomto prípade je nameraná úroveň rádiometra 2,28 V alebo 1,64 V, čo sú hodnoty o 0,2 V nižšie, ako pri meraní bez materiálovej vzorky pri tomto uhle natočenia. Predpoklad je, že najnižšia nameraná hodnota je hodnota bez vzorky materiálu, kde rádiometer zachytáva určitú časť žiarenia priamo prostredníctvom priamej viditeľnosti. Pri meraní so vzorkami je logické brať do úvahy len vyššie namerané úrovne z dôvodu obrazu určitej časti signálu od materiálovej vzorky, ktorá sa pripočíta k tej z priamej cesty šírenia. Tento fenomén by mohol byť spôsobený nesprávnym odčítaním hodnôt z osciloskopu.

vzorka	rozmery VxŠxH [mm]	Úroveň U_{mod} [V]	Odrazivost R [-]
plech	420x370x1,5	3,38	1
polystyrén	230x350x8	0,929	0
kartón	300x400x3	0,939	0
porcelán	250x400x8	2,2	0,52
drevo	320x380x16	1,64	0,29
penená PVC doska	220x350x5	0,969	0,02
drevená dyha	270x350x3	1,27	0,14
extrudovaný polystyrén	170x350x50	0,796	-0,05
polyetylenová pena	280x380x5	0,949	0,01
žiadna vzorka	-	0,929	-

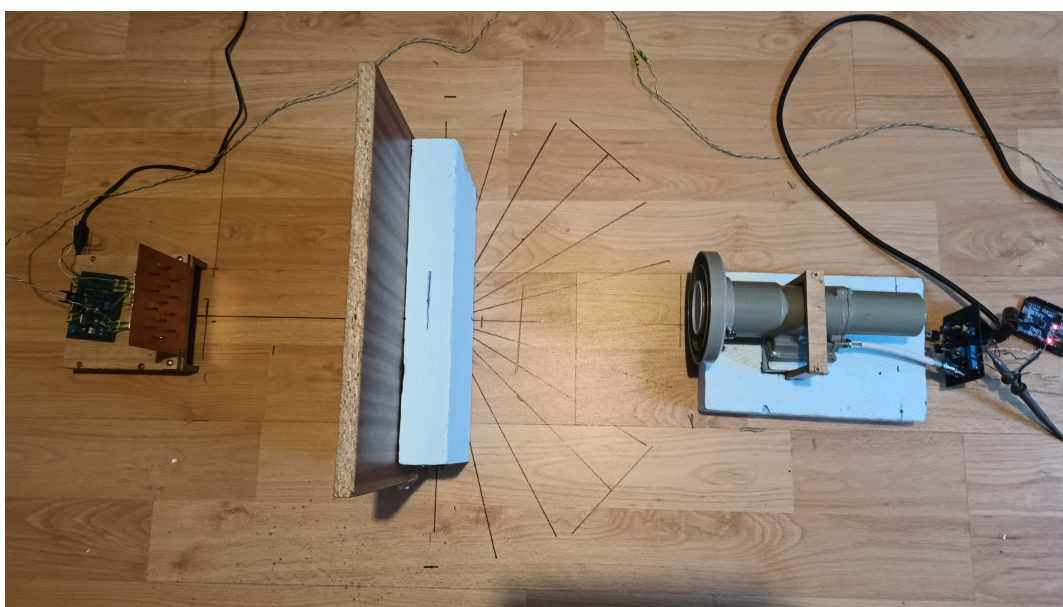
Tab. 8.4: Merané hodnoty odrazivosti

uhol dopadu [°]	$U_{outM}(drevo)$ [V]	R_{drevo} [-]	$U_{outM}(EPS)$ [V]	R_{EPS} [-]
90	0,043	-	3,63	-
75	4,07	0,76	2,28	-0,16
60	2,13	0,69	1,64	-0,12
45	1,64	0,97	0,969	0,02
30	1,26	0,78	0,796	0,11
15	1,02	0,78	0,494	0,06
0	0,868	0,78	0,414	0,03

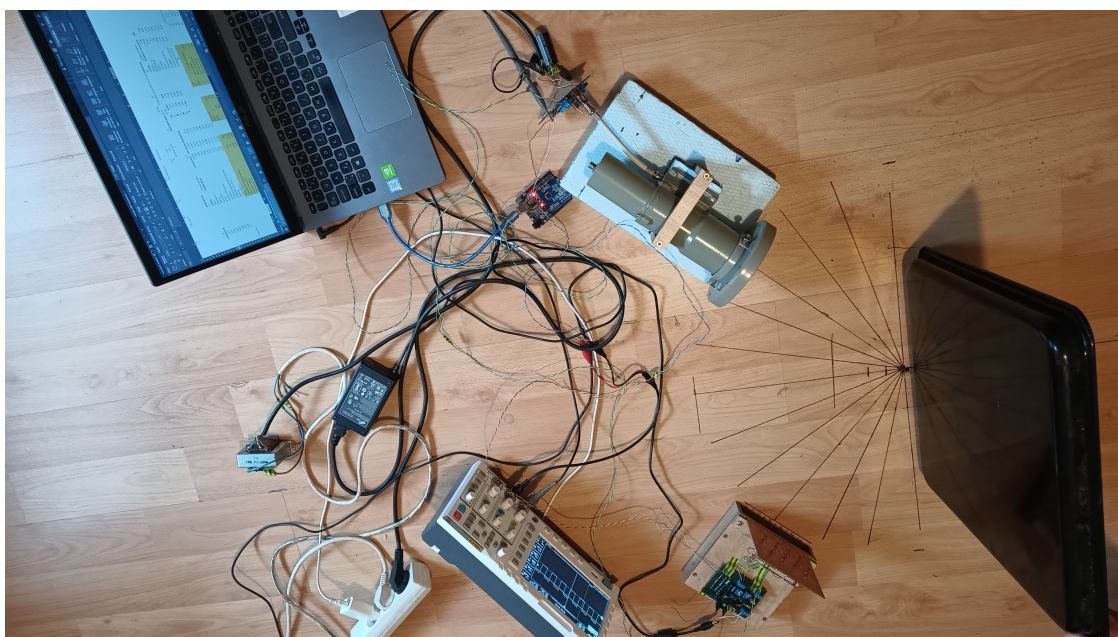
Tab. 8.5: Merané hodnoty odrazivosti materiálovej vzorky pri rôznych uhloch dopadu



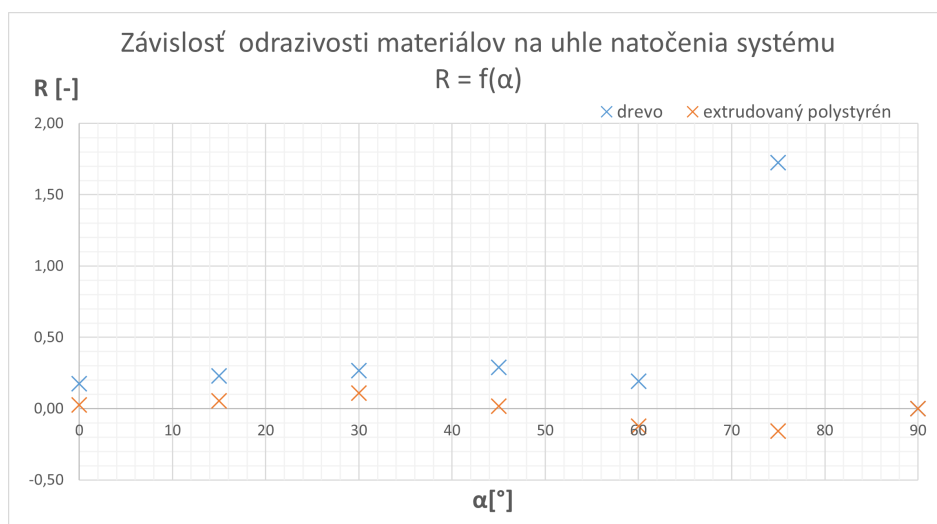
Obr. 8.10: Meranie priepustnosti extrudovaného polystyrénu



Obr. 8.11: Meranie priepustnosti materiállovej štruktúry (drevo - EPS, bez medzery)



Obr. 8.12: Fotografia merania odrazivosti plechu



Obr. 8.13: Závislosť odrazivosti materiálu na uhle natočenia od kolmice rozhrania

9 Možnosti zlepšovania parametrov systému

9.1 Koncept 2D snímania materiálovej štruktúry

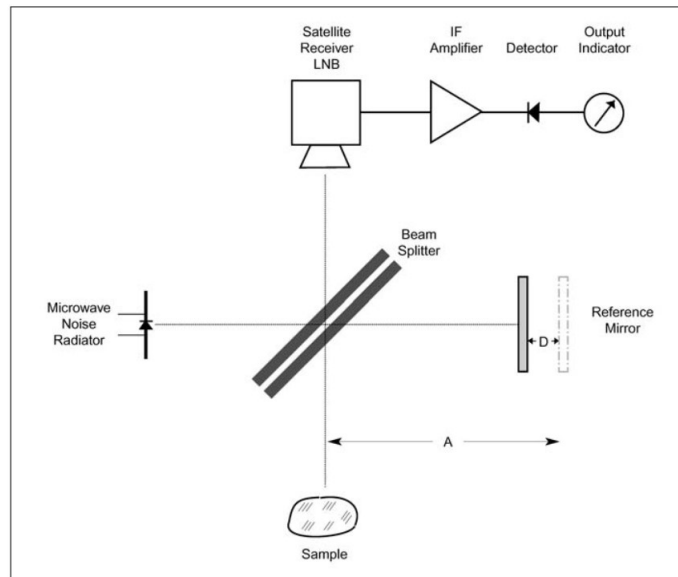
Navrhnutý systém aktívnej šumovej rádiometrie fungoval a v rámci určitých limitov bolo možné zistiť priepustnosť a odrazivosť materiálov, ktoré majú homogénnu štruktúru a tvar plochej dosky. Naskytá sa myšlienka, že systém by bolo možné vylepšiť tak, aby bol schopný merania zložitejších materiálových štruktúr. Napríklad, ak by bol materiál v tvare dosky, ktorú by tvorili dva odlišné, ale geometricky totožné homogénne materiály. Súčasný systém by pri meraní priepustnosti nameral hodnotu, ktorá by vyjadrovala priepustnosť oboch materiálov účasne. Pre myšlienkový experiment môžeme použiť vzorky z predchádzajúcich experimentov, drevo a porcelán. Ak by tieto dva materiály boli spojené do jednej štruktúry, ktorá by bola symetrická z hľadiska geometrického rozloženia materiálov, súčasný systém by zmeral určitú hodnotu celkovej priepustnosti takej to vzorky. Nebolo by však možné zistiť, cez ktorý materiál signál prechádza lepšie. Ak by sa však dalo určovať miesto, do ktorého má šumový žiarič smerovať svoju žiarenie, bolo by možné určiť priepustnosť oboch materiálov v štruktúre.

V rámci merania vyžarovacej charakteristiky sa ukázalo, že pravdepodobne nerovnomerné rozloženie prúdu na diódach má vplyv na jej tvar. Túto nedokonalosť systému je teoreticky možné použiť ako myšlienku pre zdokonalenie systému. Pri zachovaní konceptu anténneho poľa dipólov ako šumového žiariča by mohol byť žiarič upravený tak, že jeho jednotlivé anténne elementy by mohli byť regulované jednotlivo, teda prúd každého šumového prvku by mohol byť samostatne nastavený. Zmenou prúdu určitých prvkov by teoreticky bolo možné vytvarovať vyžarovaciu charakteristiku podľa potreby, alebo ju nasmerovať do určitého konkrétneho miesta. Takáto úprava by teda mohla byť použitá na meranie odrazivosti alebo priepustnosti 2D profilu materiálovej vzorky. Tento koncept má svoje limity, nakoľko vyžarovacia charakteristika je dosť široká a je obtiažne určiť kde presne v priestore sa nachádza jej maximum, resp. akú veľkú plochu materiálu pokrýva. Preto by snímanie v 2D bolo možné len na veľkých plochách materiálu, v ráde niekoľkých jednotiek metrov štvorcových. Táto limitácia by sa dala zlepšiť použitím vysokosmerových antén, kde by prakticky väčšia smerovosť znamenala väčšie rozlíšenie na skenovanej 2D ploche. Bolo by to zapríčinené tým že by sa zúžila vyžarovacia charakteristika na menšiu plochu.

9.2 Koncept mikrovlnnej šumovej tomografie

Princíp optickej koherenčnej tomografie by mohol tvoriť základ pre snímanie profilu pomocou systému aktívnej šumovej rádiometrie. Michelsonov interferometer z Obr.3.1

však musí byť prispôsobený na mikrovlnné pásmo a šumový signál. Koncept mikrovlnnej šumovej tomografie je na Obr.9.1.



Obr. 9.1: Princíp mikrovlnnej šumovej tomografie [30]

Namiesto zdroja infračerveného svetla by bol použitý šumový žiarič. Charakter vysielaného žiarenie z pohľadu koherencie je podobný, mikrovlnný šumový žiarič je tiež nekoherentný zdroj žiarenia. Pri zaistení dostatočne výkonného mikrovlnného žiariča by mohlo mať generované šumové pole dostatočnú intenzitu, aby preklenulo útlmy spôsobené odrazom od vzorky a šírením po trasách a zanechalo tak na prijímači detekovateľný signál. Fotodióda detektora z OCT by v tomto prípade mohla byť nahradená šumovým rádiometrom. Je však ešte potrebné prispôbiť materiál zrkadiel. V prípade referenčného zrkadla je možné použiť medennú plochu pre takmer dokonalý odraz mikrovlnného žiarenia. V prípade polopriepustného zrkadla je situácia o niečo zložitejšia. Je potrebné ho nahradiť materiálom, ktorý do určitej miery mikrovlnné žiarenie odráža, ale časť z neho aj prepustí ku skúmanému objektu. Preto musí byť sklenený materiál nahradený iným materiálom s určenými konštantami ϵ_r a μ_r , ktoré zaistia dostatočnú odrazivosť od dielektrika a zároveň aj dostatočnú priepustnosť takejto dielektrickej platničky[30]. Nakoľko pri odraz od skúmaného objektu vzniká aj strata absorpciou vo vnútri objektu, je potrebné na trase ku vzorke väčšiu intenzitu žiarenia. Preto materiál musí byť viacej priepustný, ako odrazivý. Na základe vykonaných experimentov by dielektrikum mohlo byť použitá drevená doska, alebo porcelán. Tieto médiá nemajú príliš veľkú priepustnosť ani odrazivosť, čo je výhodné, aby sa signál rozdelil rovnomernejšie ku vzorke a k odrazovej doske. Otázkou zostáva, na aké vzorky materiálu by sa dal systém aplikovať .

Pri uvážení vlnovej dĺžky mikrovlnného žiarenia zo systému šumovej rádiometrie (8 cm) by bol príliš hrubý krok na snímanie tenkých štruktúr, vyskytujúcich sa napríklad v lekárstve. Uplatnenie by však mohol nájsť v industriálnej sfére. Využiť by sa mohol pri zisťovaní hĺbkového profilu betónu, hľadania defektov v múroch stavieb alebo podobných štruktúrach. Pre väčšie rozlíšenie hĺbkovej štruktúry by bolo potrebné zvýšiť pracovnú frekvenciu žiariča, čo by znamenalo prakticky celkovú rekonštrukciu navrhnutého systému, počnúc šumovým žiaričom a jeho rozmermi, až po zmenu vstupného konvertoru rádiometra.

Závěr

Cielom mojej diplomovej práce bolo preštudovať využitie mikrovlnného šumu v oblasti aktívnej rádiometrie a navrhnúť možný koncept meracieho systému, zahŕňajúci konštrukčné, konceptuálne a elektronické riešenie. Ďalej tento návrh prakticky realizovať a uskutočniť experimenty na materiálových vzorkách pre overenie vlastností systému. V prvej kapitole sa práca zaoberala prieskumom rôznych druhov šumu a ich vlastnosťami a spôsobom vzniku. Následne sa práca zaoberala rozborom zdrojov šumu, elektromagnetickým šumovým polom a princípom aktívnej rádiometrie a jej využitiu pre zisťovanie vlastností materiálov. Ďalej bol riešený návrh systému aktívnej šumovej rádiometrie. Bol realizovaný a navrhnutý ENR tester, ktorý slúžil na zisťovanie ENR parametru šum generujúcich súčiastok. Ďalej v návrhu sa práca venovala jednotlivým častiam šumového rádiometra pričom základný koncept systému vychádzal z poznatkov Dr. Polívky. Tento koncept bol obohatený o časť detektora, kde bol použitý a odskúšaný synchronný detektor s integrovaným obvodom AD630. Obmenou prešiel aktívny výstupný filter. Bol realizovaný mikrovlnný šumový žiarič zložený z anténneho poľa a napájacieho obvodu žiariča. Boli zrealizované experimenty pre zistenie vplyvu spájania šumových žiarič do anténneho poľa a taktiež vplyv reflektora na celkový zisk žiariča.

V tejto práci sa podarilo systém realizovať a experimentálne overiť. S navrhnutým systémom boli vykonané experimenty na overenie jeho základných parametrov. Následne boli realizované experimenty s materiálovými vzorkami. Podľa meraní odrazivosť a priepustnosť testovaných materiálových vzoriek je možné hodnotiť, že podľa vzťahu (4.12) hodnoty relatívne presne sedia. Použitie synchronnej detekcie malo priaznivý vplyv na citlivosť rádiometra. Šumový žiarič mal pri modulovanom prúde prúde cca 450mA výkon taký, že s danou citlivosťou bolo možné zachytiť signál s nízkou hodnotou na vzdialenosť 3 m. Na základe vykonaných experimentov sa javí, že šumová rádiometria môže byť vhodnou alternatívou pre meranie parametrov materiálov. Výhodou tohoto systému bola relatívna jednoduchosť konštrukcie nakoľko použitie LNB konvertora vyriešilo problém s návrhom nízkošumového zosilňovača a zmiešavača signálov. Principiálnou výhodou bolo použitie šumového poľa, ktoré malo veľkú šírku pásma vzhľadom na použitie budenia s kontinuálnou vlnou a tým mohli byť viacej potlačené účinky stojatého vlnenia. Nevýhodou bola konštrukcia dostatočne výkonného šumového žiariča, nakoľko polovodičové súčiastky generujú len malé množstvo šumu a je preto potrebné ich spájať do väčších celkov, v tomto prípade anténneho poľa. Na konci práce boli diskutované zlepšenia navrhnutého systému pre aplikáciu 2D skenovania materiálovej vzorky a použitie v systéme v mikrovlnnej šumovej tomografii, ako obdoby optickej koherenčnej tomografie.

Literatúra

- [1] WINFIELD Hill HOROWITZ Paul. *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, New York, 3 edition, 2015.
- [2] C. Lee, J.D. Powell, and Per Enge. Atmospheric noise: Data collection and analysis. page 10, 01 2006.
- [3] Frank Leferink, François Silva, Johan Catrysse, Sven Battermann, Beauvois Véronique, and Anne Roc'h. Man-made noise in our living environments. *Radio Sci Bull*, 334, 01 2012.
- [4] VÁGNER Petr. Vysokofrekvenční technika. Skriptum FEKT VUT Brno, Október 2013.
- [5] Analog Devices. Noise figure measurement methods and formulas, 2003. URL: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/noise-figure-measurement-methods-and-formulas--maxim-integrated.html>.
- [6] Noisewave. *NW-Diode Series*. URL: https://noisewave.com/spec_sheets/NW-diode_C.pdf.
- [7] Jiri Polivka. Experiments with microwave coherence tomography: Part 2. *High Frequency Electronics*, pages 39–40, 2006.
- [8] A. Sinitsyn, Bogota, Colombia, Institute Dynamics, Control Theory, Russia Dulov, V. Vedenyapin, Keldysh Mathematics, and Russia. *Kinetic Boltzmann, Vlasov and Related Equations*. 06 2011. doi:10.1016/C2011-0-00134-5.
- [9] Marvin Chodorow, Robert Symons, David Abe, Richard Abrams, Bruce Danly, Henry Freund, Kevin Jensen, Baruch Levush, Robert Myers, Robert Parker, Jonathan Shaw, Arnold Shih, and Joan Yater. 16 - electron tubes. In Wendy M. Middleton and Mac E. Van Valkenburg, editors, *Reference Data for Engineers (Ninth Edition)*, pages 16–1–16–59. Newnes, Woburn, ninth edition edition, 2002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750672917500182>, doi:10.1016/B978-075067291-7/50018-2.
- [10] POLÍVKA Jiri. Kouzlo mikrovlnného šumu. *Praktická elektronika*, 16(5):31–32, 2011.
- [11] HENDERSON Tom. Physics tutorial: Young's experiment. [online], 1999. URL: <https://www.physicsclassroom.com/class/light/Lesson-3/Young-s-Experiment>.

- [12] Jiri Polivka. Noise can be good, too, Jan 2012. URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/1745-noise-can-be-good-too>.
- [13] Adolf F. Fercher, Wolfgang Drexler, Christoph K. Hitzenberger, and Theo Lasser. Optical coherence tomography - principles and applications. *Reports on Progress in Physics*, 66:239–303, 2003.
- [14] Jiri POLIVKA, Pavel FIALA, and Jan MACHAC. Microwave noise field behaves like white light. *Progress In Electromagnetics Research*, 111:311–330, 01 2011. doi:10.2528/PIER10041304.
- [15] Straton A. Julius. *Electromagnetic theory*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2015.
- [16] Jaroslav REICHL and Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky. URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/436-odraz-a-lom-svetla>.
- [17] Mildred Dresselhaus, Gene Dresselhaus, Stephen B. Cronin, Antonio Gomes Souza Filho, and Mildred Dresselhaus. *Review of Fundamental Relations for Optical Phenomena*, page 317–327. Springer Berlin, 1 edition, 2019.
- [18] Vowinkel Bernd. Microwave-radiometer. page 9, 11 2009.
- [19] Colliander Andreas. Noise injection radiometer test specifications and requirement. page 104, 01 2002.
- [20] NOVÁČEK Zdeňek. Elektromagnetické vlny, antény a vedení. Skriptum FEKT VUT Brno, September 2007.
- [21] Jiri POLIVKA. Spatial combining of multiple microwave noise radiators. *High Frequency Electronics*, page 5, 2008.
- [22] James Agajo, Onyebuchi Nosiri, Okeke Chukwuejekwu, and Okoro N. Modelling, simulation and analysis of a low-noise block converter (lnbc) used for communication satellite reception using matlab. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, 3:67–75, 09 2015.
- [23] inverto. *Premium Single universal 40mm PLL LNB*. URL: <https://inverto.tv/download/file/5c064737a1b20-1543915319.pdf>.
- [24] Linear technology. *Precision 300MHz to 7GHz RF Detector with Shutdown and Offset Adjustmtr*, Jún 2004. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/5531f.pdf>.

- [25] Analog devices. *Balanced Modulator/Demodulator*, Jún 2015-2016. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD630.pdf>.
- [26] Murata. *LQW18AS47NG00D*, Február 2020. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/2904957.pdf>.
- [27] Franco Rota. 10mhz - 10ghz noise source diodes. page 8, 04 2008.
- [28] Arduino. *Arduino UNO R3*, Marec 2024. URL: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>.
- [29] Mathworks, Inc. *Support Package for Arduino® Hardware User's Guide*, Marec 2024. URL: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/arduino_ug.pdf.
- [30] Jiri Polivka. An overview of microwave sensor technology. *High Frequency Electronics*, 01 2007.

Zoznam symbolov a skratiek

P_N	výkon šumu
B	šírka frekvenčného pásma
λ	vlnová dĺžka vlny
t_{tot}	celková priepustnosť materiálu na rozhraní
t	celková priepustnosť materiálovej vzorky
E_{inc}	intenzita elektrického dopadajúceho poľa na rozhranie
E_{ref}	intenzita elektrického odrazeného poľa na rozhranie
r_{tot}	celková odrazivosť materiálu na rozhraní
r_s	odrazivosť materiálu na rozhraní pri vlnení s s-polarizáciou
r_p	odrazivosť materiálu na rozhraní pri vlnení s p-polarizáciou
D	najväčší rozmer antény
n	absolútny index lomu prostredia
L	celkový útlm matriálovej vzorky
L_c	koherentná dĺžka
τ	časová konštanta
f	frekvencia
ϵ_r	relatívna permitivita
μ_r	relatívna permeabilita
ϵ_0	permitivita vákua
μ_0	permeabilita vákua
$\Delta\lambda$	spektrálna šírka svetelného zdroja
P_R	výkon prijatý na príjmači
d	vzdialenosť
c	rýchlosť svetla vo vákuu

R	odpor
C	kapacita
T_0	teplota okolia
T_G	šumová teplota objektu
v	fázová rýchlosť svetla v materiály
k	boltzmanova konštanta
$FSPL$	straty šírením vo voľnom priestore
LNB	Low noise block
ENR	excess noise ratio
MCT	mikrovlnná koherenčná tomografia
OCT	optická koherenčná tomografia